

电子技术及应用

范新光 陈玉华

小型水电站运行工人培训教材

水利电力出版社

小型水电站运行工人培训教材

电子技术及应用

范新光 陈玉华

水利电力出版社

小型水电站运行工人培训教材

电子技术及应用

范新光 陈玉华

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 12.625印张 334千字

1984年7月第一版 1984年7月北京第一次印刷

印数 00001—17630册 定价 1.60元

书号 15143·5430

内 容 简 介

本书是针对小型水电站电子技术应用的实际情况而编写的一本培训教材。全书共分八章，第一章至第七章为基本电路，主要内容有：半导体的基本知识；半导体器件；晶体管交直流放大电路；晶体管开关电路；不控整流电路及可控整流电路等。第八章为应用电路，介绍了一些小型水电站常用电子设备和装置的工作原理，它是基本电路的综合应用。

本书可作为小型水电站工人的培训教材，也可供具有初中以上文化程度的同志自学，还可作为中等专业学校有关课程的参考书。

用本书作培训教材，以计划120学时为宜。

前 言

近年来，我国小水电建设发展很快。为了提高小水电站、电网运行工人的技术和管理水平，充分发挥小水电的经济效益，巩固和扩大办电成果，迫切需要加强对职工进行技术培训。为此，我们组织成都科技大学的有关同志，编写了培训讲义。经多次使用并广泛征求读者意见，现修改编写成这套“小型水电站运行工人培训教材”，供各地举办技术培训班之用。全套教材共十一册：《电工数学基础》、《电工原理》、《电子技术及应用》、《电机原理和运行》、《电工仪表和测量》、《水电站电气一次部分》、《水电站电气二次部分》、《小型电力系统》、《水轮机》、《水轮机调节》、《水轮发电机组辅助设备及自动化》。本教材内容丰富、针对性较强、理论联系实际，凡小型水电站和35千伏及以下电网运行、维护、检修中应当掌握的主要知识，都作了较系统的讲述。对有关领域的新设备和新技术，也有简要的介绍。

本教材适用于培训具有初中毕业文化程度的小型水电站和电网的发、供电运行工人，也可作为具有同等文化程度的有关人员的自学参考书。各地可根据实际需要，选用其中有关分册，进行培训。一般以半年为一期，总教学时数控制在500学时左右。

《电子技术及应用》一书由范新光、陈玉华编写，肖可达审阅，教学时数约为120学时。

由于受经验和水平限制，本书中存在的缺点和问题，恳请读者批评指正。

四川省地方电力公司

1983年8月

目 录

前 言

第一章 半导体二极管和三极管	1
1-1 半导体	1
1-2 PN结	6
1-3 半导体二极管	10
1-4 硅稳压二极管	15
1-5 半导体三极管	20
习题及思考题(一)	37
第二章 晶体管交流放大电路	39
2-1 单管交流放大电路	39
2-2 阻容耦合多级放大电路	71
2-3 放大电路中的负反馈	77
2-4 射极输出器	86
2-5 变压器耦合功率放大电路	89
习题及思考题(二)	99
第三章 直流放大电路	106
3-1 直接耦合放大电路	106
3-2 差动放大电路	114
3-3 典型的差动放大电路	120
3-4 差动放大电路的其它形式	127
3-5 集成运算放大器	133
习题及思考题(三)	145
第四章 晶体管开关电路	148
4-1 脉冲的波形和参数	148
4-2 半导体管的开关作用	150

4-3	电容器的充放电和脉冲波形的变换	155
4-4	门电路	169
4-5	双稳态触发电路	181
4-6	集—基耦合单稳态触发电路	194
	习题及思考题(四)	197
第五章	不控整流电路与直流稳压电源	201
5-1	单相半波整流电路	202
5-2	单相桥式整流电路	207
5-3	三相半波整流电路	210
5-4	三相桥式整流电路	215
5-5	裂相整流电路	221
5-6	晶体管逆变—整流电路	224
5-7	滤波电路	227
5-8	硅稳压管稳压电路	237
5-9	串联型晶体管稳压电路	242
5-10	并联型晶体管稳压电路	252
	习题及思考题(五)	255
第六章	可控硅主电路	257
6-1	可控硅	257
6-2	可控整流电路	267
6-3	可控硅元件的选择	300
6-4	可控硅元件的保护	303
	习题及思考题(六)	313
第七章	可控硅触发电路	314
7-1	对可控硅触发电路的基本要求	314
7-2	单结晶体管触发电路	315
7-3	使用小容量可控硅的触发电路	344
7-4	晶体管触发电路	347
	习题及思考题(七)	351
第八章	应用电路举例	352

8-1	可控硅无触点开关·····	352
8-2	BL-7A型二相过流保护 ·····	356
8-3	KGCA-1型可控硅充电机 ·····	362
8-4	两相零式可控硅励磁自动调节装置 ·····	371
8-5	TF-1型准同期装置 ·····	379
8-6	RZT-2型并联电容器自动投退控制器 ·····	383
附录 I	国产半导体器件型号命名法 ·····	390
附录 II	ZP型整流二极管的型号命名法及参数 ·····	391
附录 III	KP型可控硅及KK型快速可控硅的型号命名 法及参数 ·····	392
附录 IV	单晶体管的主要参数 ·····	394
	习题及思考题答案 ·····	395

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是一种非常有用的电子器件。虽然它的发展历史还很短，但由于它具有许多独特的优点，诸如体积小、重量轻、寿命长、耗电省、功率转换效率高，因而获得了极为广泛的应用。随着电子技术的迅速发展，在电厂自动化生产过程中，人们越来越多地采用由各种半导体器件组成的电子线路。

本章首先讨论半导体的结构特点、导电机理和PN结原理。然后在此基础上，介绍晶体管电路中常用的几种半导体器件——半导体二极管、硅稳压二极管和半导体三极管的基本结构、特性和参数。

1-1 半 导 体

一、半导体的原子结构特点

各种半导体器件都是用半导体材料并采用适当的工艺制成的。为要了解半导体材料的电性能，首先必须对半导体的原子结构特点有一个粗浅的认识。

众所周知，世界一切物质都是由中性原子构成的，而所有的原子又是由带正电荷的原子核和带等量负电荷的电子所组成。在原子模型里，核外电子分层排列在圆形或椭圆形的不同轨道上，并不停地围绕原子核而转动。原子的化学性质取决于最外层电子的数目和最外层电子与核之间的距离。由于原子核的组成以及核外电子的数目和排列方式的不同，因而使得各种物质的导电能力有着很大的差别。

硅和锗是电子学中两种最重要的半导体材料，它们位于元素周期表的第四列，最外层有四个电子（又叫价电子），故称四价

元素。硅和锗的晶体结构为四面体，每个原子的四个价电子与相邻四个原子的价电子形成共价键。图1-1是硅晶体中共价键结构的平面示意图。图中+4代表除去四个价电子后原子的净电荷量。价电子用黑色的小圆点表示，把这些原子联系在一起的键用曲线表示，这些键叫作共价键。

在温度为绝对零度时，硅原子中所有的最外层电子被共价键紧紧地束缚着，没有自由载流子，硅也就成了一个绝缘体。

二、电子—空穴对的产生与复合

在室温下，硅晶体中有少量的外层电子能够获得足够的能量，挣脱共价键的束缚而成为自由电子。从图1-2中可以看到，一个电子挣脱共价键束缚而成为自由电子时，同时在破裂的共价键中便产生了一个空位，或者叫空穴。电子和空穴是同时产生的，跑出一个价电子就会同时产生一个空穴。一个空穴所带的正电荷，在数值上等于一个电子所带的负电荷。温度越高，晶体中所产生的自由电子和空穴也就越多。有空穴的原子有能力吸引邻近原子的电子，而邻近原子共价键中的电子，由于热激发又有可能摆脱原来的原子去填补这个空穴。空穴在新的地方出现，犹如正电荷移到一个新的位置，如此继续下去。

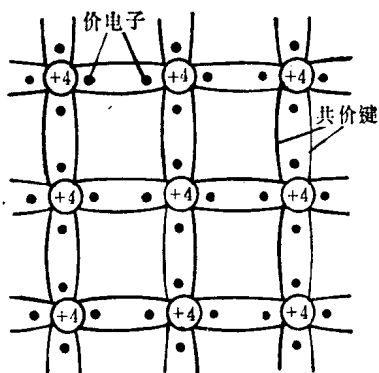


图 1-1 硅晶体共价键结构
平面示意图

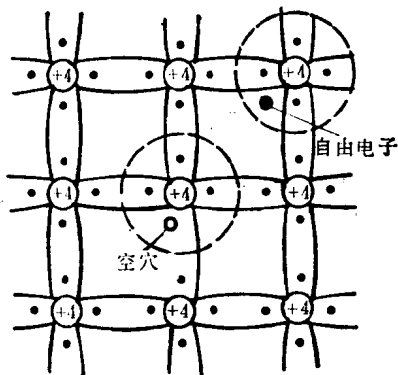


图 1-2 一个共价键破裂的
硅晶片

由此可见，在半导体内部，一旦产生了电子、空穴对，不仅带负电荷的自由电子在随机地运动着，就是带正电荷的空穴也在随机地运动着。当它们相遇时，自由电子便填补了空穴，这时自由电子不存在了，空穴也不存在了，正负电荷同时消失，这种现象叫作复合。在纯净半导体（本征半导体）中，电子和空穴总是成对地产生、又是成对地复合的。热平衡时，在单位时间内，电子一空穴对产生与复合的数量是相等的。因此，在一定的温度下，半导体内部维持着一定的电子（空穴）密度。

三、半导体中的两种导电现象

我们知道，物质的导电能力依赖于物质中的自由电荷载流子数。如上所述，热或其它形式的能量，能使晶体共价键中的电子摆脱共价键的束缚而成为自由电子，并同时产生等量的空穴。因为自由电子和空穴都是一种电荷载流子，所以它们都可参与导电。图1-3中的实验表明，当在一块本征半导体两端加上电压 E 时，微安表中便有很小的电流流过。这是因为在半导体材料中有两种载流子：一方面，自由电子带负电，在外加电压作用下，将逆电场方向而运动，形成电子电流 I_N ；另一方面，空穴带正电，它会顺着电场方向运动，形成空穴电流 I_P 。由于电子电流与空穴电流的方向相反，所以流过微安表的总电流 $I = I_N + I_P$ 。需要注意的是： I_N 是自由电子在外加电场作用下形成的一种电子电流，

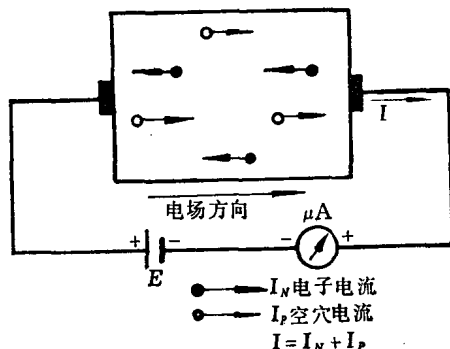


图 1-3 本征半导体中电荷的运动

而 I_p 则是共价键中的电子挣脱共价键的束缚，以填补邻近原子中的空穴所形成的一种填充电子电流，两者不可混淆。

综上所述，在半导体中同时有电子和空穴参与导电，这是它与金属导电的区别所在。应当指出，本征半导体在室温下受热激发而产生的电子—空穴对，其数量很少，因而它的导电能力介于导体与绝缘体之间，故称为半导体。

四、杂质半导体

前面提到的本征半导体，在常温下受热激发产生的电子和空穴数目有限，因而导电能力仍然很差。如果将微量特殊的杂质掺入本征半导体的晶体中，其导电能力将会大大增加。人们正是利用掺杂的方法，控制加入杂质的浓度，制造出了各种不同性质、不同用途的半导体器件。为了与本征半导体相区别，我们把掺入杂质的半导体叫杂质半导体。当然，这里所说的在本征半导体中加入的杂质是有选择性的，而且掺杂的工艺和杂质的数量都是有

严格规定的。

(一) N型半导体

如果将少量五价元素的磷加入硅晶体中，那末，每个磷原子的五个价电子，只能和它邻近的硅原子的四个价电子形成共价键，多余的一个电子只受到磷原子核的吸引，束缚力很弱，在常温下就可挣脱磷原子的束缚而成为自由电子，如图1-4所示。

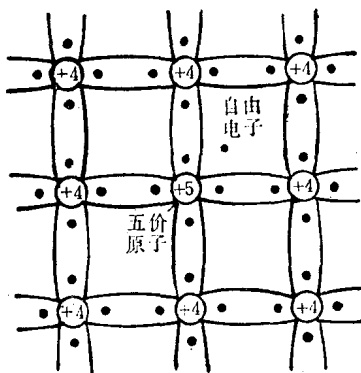


图 1-4 硅晶体中加入五价元素磷产生自由电子

从图上可以看出，一个磷原子提供一个自由电子，而它本身没有产生空穴。我们把这个五价原子叫作施主原子，因为它给出了一个自由电子。在这种杂质半导体中，加入多少个磷原子就会带来多少个自由电子。很显然，电子的总数量将大大增加，因而导电能力也就显著增强。

在施主杂质半导体中，自由电子被称为多数载流子（以后简称多子）。这种半导体主要靠电子导电，所以叫电子型半导体，又叫N型半导体。在N型半导体中，除了因加入五价元素而产生的多子电子外，还有因本征激发而产生的少数载流子（以后简称少子）空穴。

（二）P型半导体

如果在硅晶体中加入少量的三价元素硼，由于硼原子最外层只有三个价电子，因而每个硼原子与邻近的四个硅原子的价电子结合时，结果在每四个共价键中便产生了一个空穴，如图1-5所示。

由于空穴的存在，相邻硅原子共价键中的价电子，在大约 -223°C 时就有足够的能量跑过来填补这个空位。因此，我们能够说，空穴能在晶体中自由运动，而三价硼原子却保持一个固定的负电荷。这个硼原子就称为受主原子，因为从它的邻居那里接受了一个电子。同样，加入多少个硼原子就会带来多少个空穴，因而晶体中的空穴数目大大增加。这种半导体主要靠空穴导电，所以叫空穴型半导体，又称P型半导体。在P型半导体中，多子是空穴，少子是自由电子。

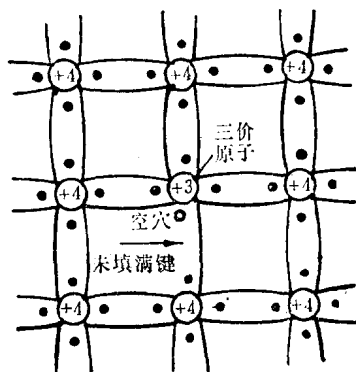


图 1-5 硅晶体中加入三价元素硼产生空穴

综上所述，在杂质半导体中有两种形式的电荷：不可动的离子和可动的载流子。在N型半导体中，施主原子形成不可动的正离子，而电子则是可动的载流子；在P型半导体中，受主原子形成不可动的负离子，空穴则是可动的载流子。应当指出，无论是N型还是P型半导体，它们本身仍然是电中性的，因为正负电荷的总量是相等的。

1-2 PN 结

P型或N型半导体，虽然导电能力都很强，但它们都是双向导电的，不能直接拿它做成半导体器件。然而，如果采用一定的工艺，使一块完整的半导体的一部分是P型的，另一部分是N型的，这时便在P型和N型半导体相结合的地方形成一个PN结薄层，使电流在一个方向容易流通，而在另一个方向不容易流通。

PN结是制造二极管、三极管、可控硅等多种半导体器件的基础，它的性能好坏将直接影响到器件的特性和参数。因此，对于PN结必须要有一个全面的认识。

一、PN结的形成

PN结的形成过程示意在图1-6中。下面进行说明。

(一) 多数载流子的扩散

什么是扩散呢？打个比方来说，在一个房间里，在它的一头打开一瓶香水，一会儿就会有香味传到房间的另一头，这就是日常生活中常见的一种扩散现象。当采用适当的工艺把P型和N型半导体结合在一块时，由于载流子浓度上的差异也会出现电荷的扩散现象。很清楚，在图1-6中，由于P区的空穴浓度比N区的空穴浓度大得多，所以空穴就要由浓度高的P区向浓度低的N区扩散。首先是交界面附近的空穴跑到N区去，并与N区的电子相复合，于是在P区留下一些带负电的杂质离子，形成负电荷区。同样，由于N区的电子浓度比P区大，因而电子就由浓度高的N区向浓度低的P区扩散，首先是交界面附近的电子跑到P区去，并与空穴相复合，于是在N区就留下了一些带正电的杂质离子，形成正电荷区。这些带电离子被束缚在晶格结构中，不能自由移动，它本身不能参与导电，这样就在交界面两边形成了一层很薄的空间电荷区。我们把这个空间电荷区叫PN结。在这个区域内，我们近似地认为没有可以载运电荷的载流子存在，所以空间电荷区又称为耗尽区，它的作用就象一个绝缘体。

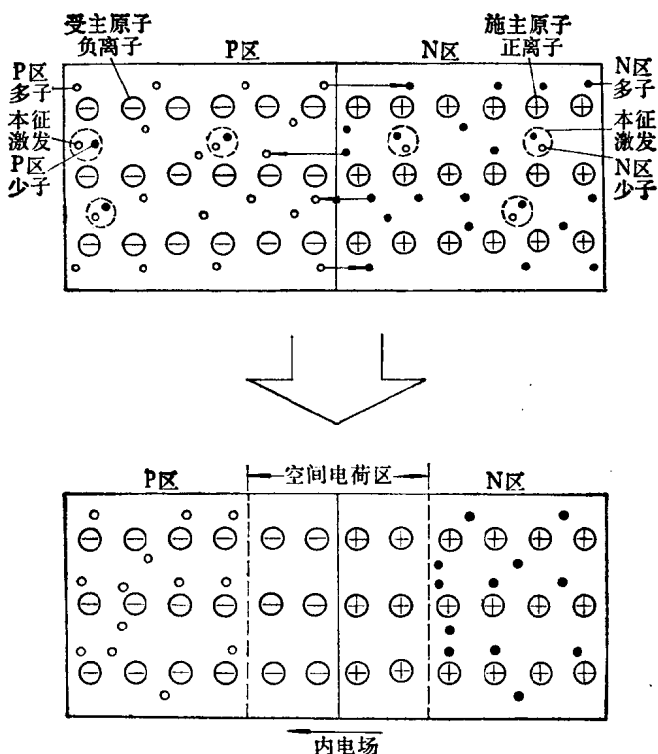


图 1-6 PN结的形成

(二) 少数载流子的漂移

由图1-6可以看出，空间电荷区的N区一边带净的正电荷，P区一边带净的负电荷，正负电荷在两种材料间形成一个由N区指向P区的内电场。随着扩散的进行，交界面两侧的空间电荷也就越来越多，因而内电场也就随之增强。由于内电场的方向是由N区指向P区，因此内电场的出现必然是：一方面阻碍P区的多子空穴向N区扩散，同时也阻碍N区内的多子电子向P区扩散；另一方面，由于少子相对于多子来说具有相反的极性，因而P区的少子电子，在内电场的作用下便顺利地通过PN结漂移到N区去。同样，N区的少子空穴，在内电场的作用下，也顺利地越过PN

结漂移到P区去。PN结对少子的这种作用叫做漂移作用。

(三) 扩散与漂移达到动态平衡

扩散与漂移共处于对立统一体中。开始时扩散占优势，但随着扩散的进行形成了空间电荷区，产生了内电场。反过来，内电场又要阻碍扩散的进行，促进少子的漂移运动。总之，扩散使空间电荷区的电荷增多，内电场增强；漂移又使空间电荷区的电荷减少，内电场减弱。最后，扩散与漂移达到动态平衡，PN结处于相对的稳定状态，形成一个宽度一定的空间电荷区（几微米至几十微米）。

最后还需说明，上面讲的是假定P区和N区的掺杂浓度相等的情况，因而形成的PN结是对称结。但在实际生产中要精确地控制掺杂浓度，使之完全相同，这是很难办到的。因此实际的PN结都是不对称的，如图1-7所示。从图中可以看到，P区掺杂浓度高，所形成的负电荷区窄；N区掺杂浓度低，形成的正电荷区宽。由此可以进一步地想象到，空间电荷区的宽度是与掺杂浓度有关的。这一点，正是我们后面将要讨论的，为什么不同型号的二极管具有不同的反向电压值。

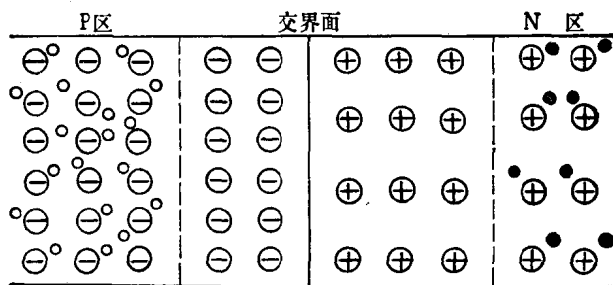


图 1-7 不对称PN结

二、PN结的单向导电性

上面讨论了PN结在无外加电压时的物理状态，这时扩散与漂移是处于动态平衡之中。现在再来讨论在PN结上外加电压时的情况。

(一) 正向偏置时空间电荷区变窄

所谓正向偏置, 就是外加电源电压 E 的正极连接到P区, 负极经限流电阻 R 连接到N区。从图1-8(a)上可以看出, 这时外加电压在PN结上产生的外电场与内电场方向相反, 这样一来, 在外加电场作用下, P区

中的空穴就要向右边扩散进入空间电荷区, 并和原来的一部分负离子相中和, 从而使P区一侧的空间电荷量减少; 与此同时, N区中的电子在外加电场作用下, 向左边扩散进入空间电荷区, 并和原来的一部分正离子相中和, 使N区一侧的空间电荷也减少。扩散的结果使空间电荷区变窄, 内电场减弱, 这时扩散运动便取得支配地位, 形成扩散电流。

扩散电流由两部分组成: 一部分是带正电荷的空穴由P区向N区作定向运动所形成的空穴电流; 另一部分是带负电荷的电子由N区向P区作定向运动所形成的电子电流。由于电流的方向规定为正电荷的运动方向, 所以这两部分电流的方向是一致的。外部电源不断地由负极向N区注入电子, 正极不断从P区拉走电子(相当于向P区注入空穴), 因而使电流得以维持。很显然, 在图1-8(a)所示串联电路中,

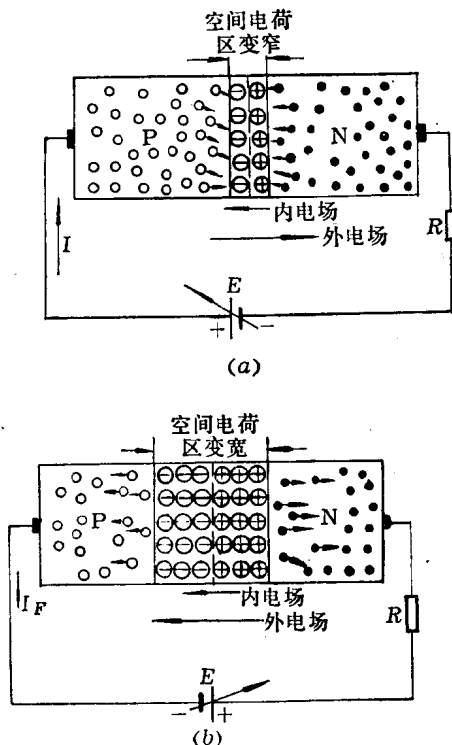


图 1-8 PN结的单向导电
(a)正向偏置; (b)反向偏置