

电子技术基础

南京电力学校主编

电力工业出版社

内 容 提 要

本书讲述电子电路的基本工作原理。内容包括整流、稳压、放大、振荡、脉冲和数字电路的工作原理及应用。主要讲述分立元件组成的基本电路。对集成电路也作了简单的介绍。

本书可作为中等专业学校有关专业电子技术课程的教材，也可供具有电工基础知识的工人、技术人员参考。

电 子 技 术 基 础

南京电力学校主编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

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

*

787×1092毫米 16 开本 22.75印张 511 千字

1981年11月第一版 1981年11月北京第一次印刷

印数 00001—45100 册 定价 1.80元

书号 15036·4232

前 言

本书是根据1978年原水利电力部制定的“高等和中等专业学校教材编审规划(草案)”,按照中等专业学校发电厂及电力系统专业“电子技术基础”编写大纲编写的。送审稿曾在电力类一些中等专业学校有关专业试用。

本书内容为电子技术的基础知识,介绍常用半导体器件的基本原理、特性及其应用,着重讲述整流、稳压、放大、振荡、脉冲和数字电路(主要是由分立元件组成的单元电路)的基本工作原理。本书除具有较大的适应性外,各章之间还具有相对的独立性。书中带有*号的部分在教学与学习中可按需要予以取舍。

参加本书编写的同志有:湖南电力学校周元伟(第一、二、八章);山东电力学校孙振富(第三、四、五章);北京电力学校李志贤(第六、七章),马亦尚(第十二章);西安电力学校杨秀芳(第九章),蔡德厚(第十一章);南京电力学校张若辉(第十章第一、二、三节及附录),阎德仁(第十章第四、五节),史玉良(第十章第六节)。

全书由张若辉主编,并参照电力部1980年组织修订的中等专业学校发电厂及电力系统专业“电子技术基础”课程教学大纲(试行)讨论稿,对有关章节作了修改和补充。

东北水利水电学校王克姣、董先治担任本书的主审,哈尔滨电力学校、长春电力学校、重庆电力学校和淮南电力学校的有关同志参加本书的审稿会议,提出了宝贵的意见,在此一并致以深切的谢意。

限于编者水平,书中难免有不当或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

一九八一年三月

目 录

第一章 PN 结和晶体二极管	1
第一节 半导体的导电特性	1
一、什么是半导体 (1) 二、半导体中的载流子 (2)	
第二节 PN 结	6
一、 PN 结的形成 (6) 二、 PN 结的单向导电特性 (7) 三、 PN 结的击穿 (8) 四、 PN 结的电容 (9)	
第三节 晶体二极管	11
一、二极管的结构 (11) 二、二极管的特性和参数 (12)	
习题	16
第二章 二极管整流和稳压电路	18
第一节 单相整流	18
一、单相半波整流 (18) 二、单相全波整流 (20) 三、单相桥式整流 (21) 四、倍压整流 (23)	
第二节 滤波器	25
一、电容滤波器 (25) 二、电阻 - 电容滤波器 (28) 三、电感 - 电容滤波器 (29)	
第三节 稳压二极管稳压电路	30
一、稳压的基本原理 (30) 二、硅稳压二极管的工作特性 (31) 三、硅稳压管稳压电路 (33) 四、稳压电路的温度补偿 (37)	
习题	38
第三章 晶体三极管及其放大电路原理	41
第一节 晶体三极管	41
一、三极管的基本结构 (41) 二、三极管的电流放大作用 (41) 三、三极管的输入、输出特性 (43) 四、三极管的主要参数 (46)	
第二节 放大电路的基本工作原理	50
一、基本放大电路 (50) 二、放大电路的工作情况 (51) 三、静态工作点与波形失真的关系 (58)	
第三节 静态工作点的稳定	60
一、温度对静态工作点的影响 (60) 二、工作点稳定的放大电路 (61) 三、单管放大电路设计举例 (64)	
第四节 用等效电路分析放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻	66
一、三极管等效电路 (67) 二、电压放大倍数 (68) 三、输入电阻和输出电阻 (69)	
习题	72

第四章 交流放大器	74
第一节 多级阻容耦合放大器	74
一、两级阻容耦合放大电路 (74) 二、电压放大倍数的计算 (75) 三、频率特性 (77) 四、电路举例 (78)	
第二节 放大器中的负反馈	79
一、反馈的基本概念 (79) 二、负反馈对放大器性能的影响 (82) 三、射极输出器 (89)	
第三节 功率放大器	93
一、功率放大器的耦合方式 (93) 二、单管功率放大器 (94) 三、推挽功率放大器 (99) * 四、无变压器的推挽功率放大器 (105) 五、电路举例 (108)	
第四节 场效应管放大器	109
一、场效应晶体管 (109) 二、场效应管放大器的基本分析方法 (114) 三、源极输出器 (116)	
第五节 放大器中的干扰、噪声和自激	117
习题	121
第五章 正弦波振荡器	125
第一节 振荡器的基本概念	125
第二节 LC 振荡器	127
一、 LC 选频电路 (127) 二、变压器耦合振荡器 (128) 三、电感三点式振荡器 (130) 四、电容三点式振荡器 (131)	
第三节 晶体振荡器	133
一、石英晶体谐振器 (133) 二、石英晶体振荡器 (135)	
第四节 RC 振荡器	136
一、 RC 桥式振荡器 (137) 二、 RC 移相振荡器 (139)	
习题	141
第六章 直流放大器	143
第一节 直流放大器的特殊问题	143
一、放大电路直接耦合带来的问题 (143) 二、直接耦合的几种方法 (144) 三、零点漂移的原因及解决办法 (145)	
第二节 差分放大电路	147
一、差分放大电路的工作原理 (147) 二、典型的差分放大电路及共模抑制比 (148) 三、差分放大电路的改进 (151) 四、差分放大电路的其它几种接法 (153) 五、应用实例 (154)	
习题	156
第七章 运算放大器	158
第一节 运算放大器的基本概念	158
一、什么是运算放大器 (158) 二、运算放大器的基本运算功能 (159) * 三、运算放大器的误差 (162) 四、运算放大器的输入、输出电阻 (164)	

第二节 集成运算放大器	165
一、什么是集成运算放大器 (165)	
二、电路举例 (166)	
习题	171
第八章 直流稳压电源	173
第一节 三极管串联调整型稳压电路	173
一、三极管串联调整稳压的工作原理 (173)	
二、三极管串联型稳压电源的基本形式 (174)	
三、串联型稳压电源的改进电路 (177)	
四、过载和短路保护电路 (182)	
第二节 三极管并联调整型稳压电路	183
一、三极管并联调整稳压的工作原理 (183)	
二、电路举例 (184)	
习题	185
第九章 脉冲电路	187
第一节 脉冲电路的基本知识	187
一、脉冲的波形和参数 (187)	
二、RC微分电路和积分电路 (188)	
三、三极管的开关特性 (192)	
第二节 反相器	197
一、反相器的工作原理 (197)	
二、反相器的改进电路 (200)	
三、反相器的负载能力 (202)	
四、应用举例 (203)	
第三节 双稳态触发器	205
一、双稳态触发器的工作原理 (205)	
二、双稳态触发器的工作条件 (206)	
三、触发信号的引进电路 (208)	
四、双稳态触发器的触发方式 (209)	
第四节 单稳态触发器	213
一、集-基耦合单稳态触发器的工作原理 (213)	
二、电路的改进 (216)	
三、单稳态触发器的应用 (217)	
第五节 多谐振荡器	219
一、多谐振荡器的工作原理 (219)	
二、多谐振荡器的改进电路 (221)	
第六节 射极耦合触发器	222
一、射极耦合触发器的工作原理 (222)	
二、回差及其调整 (224)	
三、射极耦合触发器的应用 (225)	
第七节 锯齿波发生器	226
一、锯齿波及其形成 (226)	
二、改善锯齿波非线性方法 (228)	
习题	231
第十章 逻辑电路及其应用	236
第一节 门电路	236
一、“门”的基本概念 (236)	
二、二极管门电路 (237)	
三、三极管门电路 (242)	
四、其它门电路 (244)	
第二节 逻辑代数	247
一、基本逻辑运算 (247)	
二、逻辑代数的常用公式 (248)	
三、逻辑函数	

的化简——代数法 (250)	四、逻辑函数的化简——图解法 (252)	
第三节 计数器和分频器		257
一、二进计数制与十进计数制 (257)	二、二进制计数器 (259)	三、二 - 十进制计数器 (261)
四、分频器 (265)		
第四节 寄存器		266
一、数码寄存器 (266)	二、移位寄存器 (269)	
第五节 译码和数码显示		271
一、数码管的结构和原理 (271)	二、辉光数码管译码器 (273)	三、荧光数码管译码器 (279)
第六节 应用举例		282
习题		287
第十一章 逻辑集成电路		292
第一节 集成电路及其分类		292
第二节 双极型逻辑集成电路		295
一、二极管-晶体管逻辑(<i>DTL</i>)电路 (295)	二、晶体管-晶体管逻辑(<i>TTL</i>)电路 (299)	
第三节 双极型集成触发器		302
一、 <i>R-S</i> 触发器 (302)	二、 <i>D</i> 触发器 (304)	三、 <i>J-K</i> 触发器 (307)
第四节 金属-氧化物-半导体逻辑集成电路		310
一、 <i>PMOS</i> 基本逻辑电路 (310)	二、 <i>CMOS</i> 基本逻辑电路 (311)	
三、 <i>MOS</i> 基本触发器 (313)		
习题		314
第十二章 可控硅整流电路		317
第一节 可控硅		317
一、可控硅及其单向导电特性 (317)	二、可控硅的阳极伏安特性和主要参数 (319)	
第二节 单相可控整流电路		323
一、单相半波可控整流电路 (323)	二、单相桥式可控整流电路 (324)	
第三节 三相可控整流电路		326
一、三相半波可控整流电路 (326)	二、三相桥式半控整流电路 (329)	
第四节 可控硅的触发电路		332
一、单结晶体管触发电路 (332)	二、三极管触发电路 (338)	三、阻容移相桥触发电路 (340)
习题		341
附录一 常用电阻器和电容器的型号、特点和标称值系列		344
附录二 半导体器件的型号		346
附录三 常用晶体二极管的特性		347

附录四	常用晶体三极管的特性·····	349
附录五	逻辑电路的图形符号·····	351
附录六	半导体集成电路的型号·····	352

第一章 PN结和晶体二极管

第一节 半导体的导电特性

一、什么是半导体

电子设备中使用的晶体二极管、晶体三极管、场效应管、可控硅以及集成电路等各种器件，其核心部分都是用半导体材料制成的。为了正确地运用这些半导体器件，必须了解和掌握它们的工作原理和特性，对半导体的导电特性首先应有个基本认识。

人们通常把导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质，即电阻率为 $10^{-3} \sim 10^7$ 欧·厘米范围内的物体叫做半导体。目前广泛应用的半导体材料有锗Ge、硅Si、砷化镓GaAs、磷化镓GaP、锑化铟InSb和硫化镉CdS等，其中以锗和硅的生产技术较成熟、用得较多。但是，半导体所以能得到广泛地应用，其原因并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是它还具有如下一些独特的性质。

(1) 半导体的电阻率受所含杂质的影响极大 纯净的半导体只要掺入微量的杂质，其电阻率就会惊人地减小，例如，硅中只要含有百万分之一的磷，其电阻率几乎下降到纯净硅的百万分之一(注意，此时硅的纯度仍为99.9999%)。

(2) 半导体的电阻率随温度升高按指数律减小 例如，纯净的锗从 20°C 升至 30°C 时，电阻率几乎减小一半。一般金属的电阻率是随温度升高而增大的，每升高 100°C ，电阻率的增加也不到一半。

(3) 半导体的电阻率随光照而显著减小 有一些特殊的半导体在电场或磁场作用下，电阻率也会发生改变。

正是利用半导体的这些特性，人们才制造出各种各样的半导体器件。半导体是为何导电的以及为什么具有上述导电特性，下面将作简要说明。

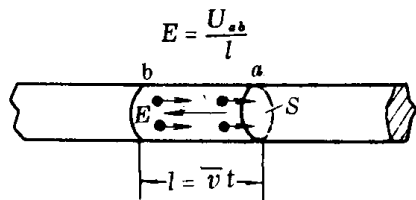
我们知道，物体的导电性是由物体内部带电粒子的移动而引起的，这种能在物体内部自由移动的带电粒子叫做载流子。金属导体中的载流子是自由电子；导电液体(电解液)中则有两种载流子——正离子和负离子；半导体中也有两种载流子，即带负电的自由电子和带正电的空穴。在没有外加电场时，载流子都只作热运动，单位时间内通过其任一截面的总电量为零，所以没有电流。但是，在外加电场的作用下，情况就不同了，每个载流子除了作热运动外，同时还有一个由电场力引起的运动——叫做漂移运动。带正电的载流子沿电场方向漂移，带负电的载流子则向电场相反方向漂移，于是形成电流。

电工学中曾讲过，金属导体的电阻率 ρ 是与自由电子的浓度有关的^①。

① 在时间 t 内，长 $l = \bar{v}t$ 一段金属导体内的载流子(自由电子)都将漂移过截面 a ，这段导体内的自由电子数为 nIS ，所以通过截面 a 的电量为 $Q = nISq$ ，

而 $I = \frac{Q}{t} = n\bar{v}Sq$ 。因为 $\rho = R \frac{S}{l} = \frac{El}{I} \cdot \frac{S}{l} = \frac{ES}{I}$ ，将 $I = n$

$\bar{v}Sq$ 代入就得到 $\rho = \frac{E}{nq\bar{v}}$ 。



$$\rho = \frac{E}{n q \bar{v}} \quad (1-1)$$

式中 n 是金属导体内载流子的浓度，即单位体积内的自由电子数； q 是电子的电量 (1.6×10^{-19} 库)； E 是导体中的电场强度； $\bar{v}$ 是在场强 E 的作用下载流子漂移的平均速度。

从式 (1-1) 可知，金属中载流子的浓度愈大，电阻率愈小，即导电能力愈好。

半导体的电阻率也与载流子的浓度有关，载流子浓度愈大， ρ 愈小。半导体是由自由电子和空穴两种载流子导电，因此它具有与金属导体不同的导电特性。

二、半导体中的载流子

1. 本征半导体

纯净的半导体（纯度要求99.99999%以上）叫做本征半导体，它是制造半导体器件的基本材料，目前用得最多的是单晶硅和单晶锗。

图 1-1 是硅和锗原子结构示意图，原子核外的电子按一定规律分层的围绕着原子核运动，最外层上的电子因受原子核的束缚力较小，它可以和别的原子最外层的电子进行交换，这种电子叫做价电子。硅和锗均有四个价电子，所以都是四价元素。

单晶硅和单晶锗的原子排列是非常有规则的，每个原子的四个价电子都和相邻的原子紧密联系，即每个原子的四个价电子分别和相邻的四个原子的价电子构成四个共价键。图 1-2 为单晶硅的共价键结构平面示意图，每个硅原子通过四对共价键受到相邻的四个硅原子的束缚。在绝对零度 (-273°C) 时，价电子没有能量脱离共价键的束缚。此时单晶硅

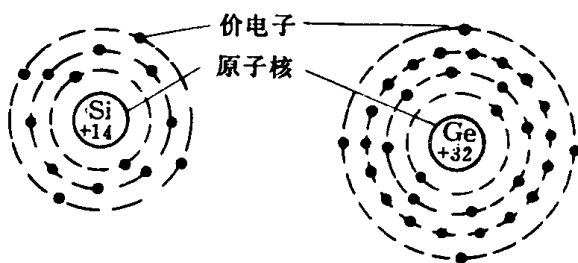


图 1-1 硅和锗原子结构示意图

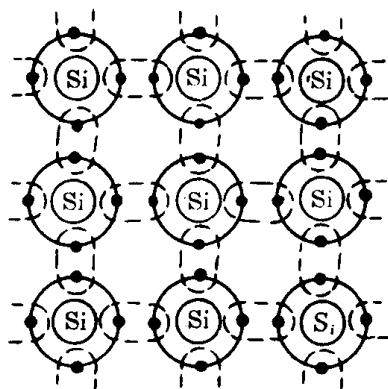


图 1-2 共价键结构平面示意图

（或单晶锗）中是没有载流子的，因为带正电的原子核都有自己的平衡位置，不能漂移，价电子又处于共价键中，也不能自由移动。但在常温下由于热运动，总有一些价电子具有较大的动能，可以摆脱共价键的束缚成为自由电子——载流子。从实验知道，硅中价电子能量大于 1.1eV (eV 为电子伏特， $1\text{电子伏特} = 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳)、锗中价电子能量只要大于 0.67eV 就能摆脱共价键束缚而成为自由电子。

价电子因热运动脱离共价键束缚成为自由电子后，在原来的共价键位置上就留下了一个空位，如图 1-3 所示，这个空位就叫做空穴。原子在正常状态时呈中性，现在失去了一个电子，因而在空穴处呈现正电，因此可以认为空穴是个正电荷，并带有与电子相等的电量。空穴也相当于一个载流子，能够参与导电，如图 1-4，在 a 处若有一个空穴，其附近共

价键中的价电子在热运动或外加电场的作用下是很容易来填补这个空位的，设 b 处的价电子填补了这个空位， a 处空穴虽然消失了，但 b 处却出现了一个空穴，这也就相当于空穴从 a 移到 b 。同理，若 c 处的价电子跑到 b 处， d 处的价电子跑到 c 处就相当于空穴从 b 到 c ，从 c 到 d ……，于是空穴便从 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow \dots$ 移动。实际上这是价电子从一个共价键转移到另一个共价键的运动，但从效果上看，正像一个带正电的粒子（空穴）在移动，所以我们把空穴当作一个带正电的载流子。

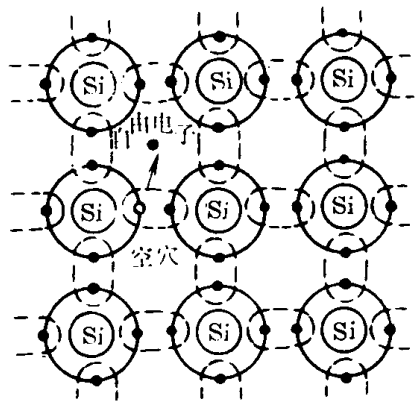


图 1-3 本征激发产生自由电子和空穴

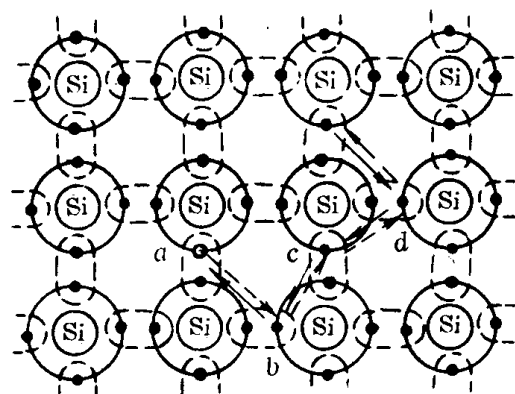


图 1-4 空穴的移动
虚线箭头表示空穴移动的方向；
实线箭头表示价电子移动的方向

这样，本征半导体中就有了自由电子和空穴两种载流子。这种由于热运动而产生载流子的现象叫做热激发，或者叫做本征激发。本征激发的自由电子和空穴总是成对产生，所以本征半导体中的自由电子浓度 n 和空穴浓度 p 是相等的。本征激发产生的自由电子和空穴都叫做本征载流子，通常用 n_i 表示本征载流子的浓度。这样，在本征半导体中 $n = p = n_i$ 。

热激发虽然是不断地进行着，但在一定温度下本征半导体中的载流子的浓度则是一定的。这是因为自由电子在运动中与空穴相遇时，便会由于复合而消失，载流子浓度愈大，复合的机会就愈多。本征载流子浓度增大，单位时间内复合的载流子数目也随之增多。当本征载流子浓度增大到一定数值时，单位时间内复合的载流子数目将增大到和激发的载流子数目相等，于是载流子浓度就处于动态平衡而保持一定的数值。例如，在 27°C 时， $n_i(\text{硅}) = 1.5 \times 10^{10}/\text{厘米}^3$ ， $n_i(\text{锗}) = 2.5 \times 10^{13}/\text{厘米}^3$ 。

温度升高时，热激发作用增强，单位时间内产生的载流子数目增加，载流子浓度增大。从实验知道，在室温附近，每升高 8°C $n_i(\text{硅})$ 约增加一倍；每升高 12°C $n_i(\text{锗})$ 约增加一倍，由此可见，半导体的电阻率将随温度升高而迅速减小。

因为半导体中有两种载流子，所以在外加电压作用下，流过半导体的电流 I 是由电子电流 I_n 和空穴电流 I_p 两部分组成 ($I = I_n + I_p$)，如图 1-5 所示。但是，在室温时下，本征载流子的浓度比金属导体中的载流子

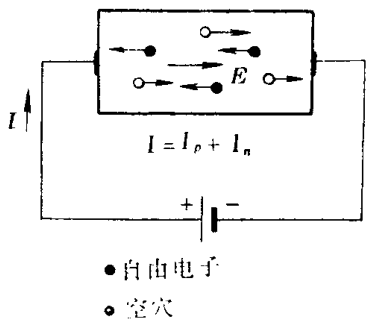


图 1-5 本征半导体中的电流

浓度要小一千亿倍左右(0℃时铜导体中自由电子浓度为 $8.5 \times 10^{22}/\text{厘米}^3$)，因此本征半导体的电阻率比金属导体要大得多，在相同的条件下，流过本征半导体的电流要比流过金属导体的电流小得多。

如上所述，本征半导体的导电能力是很差的。但是如在本征半导体中有选择地掺入少量其它元素，则可使它的导电性能发生很大的变化，从而能用来制造出各种半导体器件，这就为半导体的应用开辟了广阔的天地。掺有其它元素的半导体叫做掺杂半导体，有N型和P型两种。

2. N型半导体和P型半导体

本征半导体中掺入少量①的五价元素，例如在单晶硅内掺入适量的五价元素磷P②，就成为N型半导体。

N型半导体的特点是自由电子浓度比空穴浓度大得多，N型半导体中的自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。其导电功能主要依靠自由电子，因此叫做电子型半导体，简称N型半导体。

N型半导体中的自由电子浓度和空穴浓度不相等是由于掺入杂质而引起的。如图1-6所示，掺入硅中的磷原子被硅原子所包围。磷有五个价电子，其中四个价电子与相邻的四个硅原子结成共价键，剩下一个多余的价电子由于不受共价键的束缚，只要很小的能量(硅中约为 0.044eV ，锗中约为 0.01eV 左右)它就能摆脱磷原子的束缚成为自由电子，而留下一个带正电的磷离子。掺入硅或锗中的五价元素杂质，因为能提供自由电子载流子，所以常叫做施主杂质。这样，在N型半导体中，除了本征载流子(电子-空穴对)外，还有施主杂质提供的自由电子载流子。掺入的施主杂质虽然很少(浓度约 $10^{14} \sim 10^{20}/\text{厘米}^3$)，但在室温时，由于施主杂质原子中在共价键外的那个价电子差不多都能成为自由电子，也就是说，施主杂质提供的自由电子载流子的浓度与施主原子浓度差不多是一样的，而室温时硅中本征载流子浓度只有 $10^{10}/\text{厘米}^3$ 左右，可见，N型半导体中的自由电子浓度比空穴浓度要大得多。自由电子浓度的增大，空穴和电子复合的机会也增加，其结果是空穴的浓度比 n_i 还要减小些。

图1-7为N型半导体结构示意图。由于本征载流子所占的比例很小，图中予以省略，

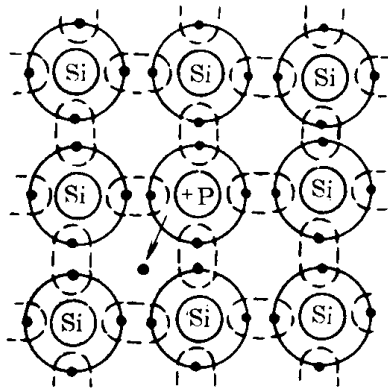


图 1-6 N型半导体

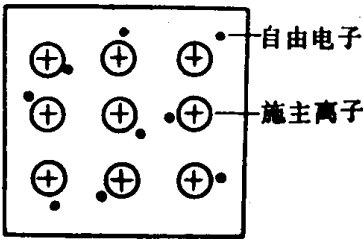


图 1-7 N型半导体结构示意图

① 掺入的杂质浓度一般在 $10^{14} \sim 10^{20}/\text{厘米}^3$ 范围内，约是本征半导体原子浓度($10^{22}/\text{厘米}^3$)的百分之一到亿分之一，视需要而定。
② 五价元素还有砷As、锑Sb、氮N等。

仅画出了施主杂质提供的自由电子载流子和留下的施主离子。应当注意，虽然N型半导体中的自由电子比空穴多得多，但整块N型半导体仍然是电中性的。

在本征半导体中掺入少量的三价元素，例如在单晶硅内掺入适量的三价元素硼B^①，就成为P型半导体。

P型半导体的特点与N型半导体正相反，空穴浓度比自由电子浓度要大得多，P型半导体中的空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子，其导电功能主要依靠空穴，所以叫做空穴型半导体，简称P型半导体。

在图1-8中可以看到，硼原子只有三个价电子，它与周围四个硅原子只能结成三个共价键，另一个共价键如a处缺少一个价电子，很容易从附近硅原子价键中夺取一个价电子过来填补，这样，硅晶体中就产生一个空穴，例如：若b处电子来填补a处空位，则b处产生一个空穴，硼原子由于多了一个电子便成为带负电的硼离子。带负电的硼离子由于与空穴相互吸引空穴受到一定的束缚，但是，只要有很小的能量（约 0.045eV ，在锗中只要 0.01eV 左右），这个空穴就能摆脱硼离子的束缚，从而形成可以导电的自由空穴。在室温下，所有这样的空穴几乎都能摆脱束缚成为载流子。

掺入硅（或锗）中的三价元素都能接受一个来自硅（或锗）原子的价电子，所以常叫做受主杂质。这样，在P型半导体中，除本征载流子外，更多的载流子是受主杂质所产生的空穴载流子，在室温时受主杂质所产生空穴载流子的浓度与受主原子的浓度差不多相等，比本征载流子浓度要大得多，所以，P型半导体中的空穴浓度远大于自由电子的浓度。

图1-9为P型半导体结构示意图。少数载流子在图中未画出。当然，整块P型半导体也是电中性的。

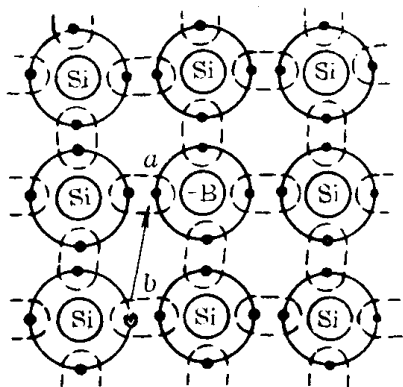


图 1-8 P型半导体

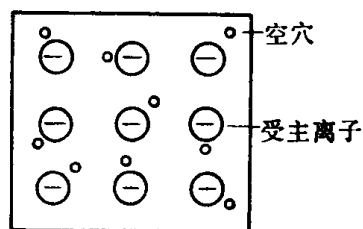


图 1-9 P型半导体结构示意图

综上所述，可得结论：①由于掺入杂质的影响，P型和N型半导体中载流子的浓度比本征半导体要大得多，其电阻率比本征半导体要小得多，例如，单晶硅中掺磷的浓度为 $1.5 \times 10^{14}/\text{厘米}^3$ ，这虽然约为硅原子浓度（ $5 \times 10^{22}/\text{厘米}^3$ ）的三亿分之一，但在室温下，磷施放出的自由电子的浓度却比本征载流子浓度约大一万倍，所以电阻率从本征半导体硅的 $2.14 \times 10^5 \text{欧} \cdot \text{厘米}$ 减小到N型半导体的30欧·厘米。②由于掺入杂质，电子-空穴成

① 三价元素还有铝Al、镓Ga、铟In等。

对出现的局面被打破，施主（或受主）杂质提供的载流子比本征载流子多得多，因此，在一定温度范围内， P 型和 N 型半导体的导电能力只便决定于掺入杂质的类型和浓度，而与本征激发无关。③本征激发是随温度升高而增强的，但施主（或受主）杂质产生的载流子却几乎不随温度升高而增多。温度不断升高，杂质所提供的载流子浓度相对于本征激发的载流子浓度来说就是不断地下降。当本征载流子的浓度增大到与杂质产生的载流子浓度相接近的时候， P 型和 N 型半导体的特征便消失，转化为本征半导体。因此，利用 P 型和 N 型半导体特性制成的半导体器件都有一个最高的工作温度（即本征激发不起主要作用时的温度），硅管约为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，锗管约为 $75\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

第二节 PN 结

一、 PN 结的形成

单独的 P 型或 N 型半导体接入电路只能起到电阻元件的作用。但是， P 型和 N 型半导体组合在一起，情况就变了，在 P 型和 N 型半导体的交界处会产生一个叫做 PN 结的薄层，这一薄层具有与单独的 P 型或 N 型半导体不同的特性。 PN 结是二极管、三极管以及其它许多半导体器件的基本组成单元。了解和掌握 PN 结的基本特性，是掌握这些器件工作原理的基础。 PN 结是什么东西？它是怎样形成的？下面我们用工1-10来说明。

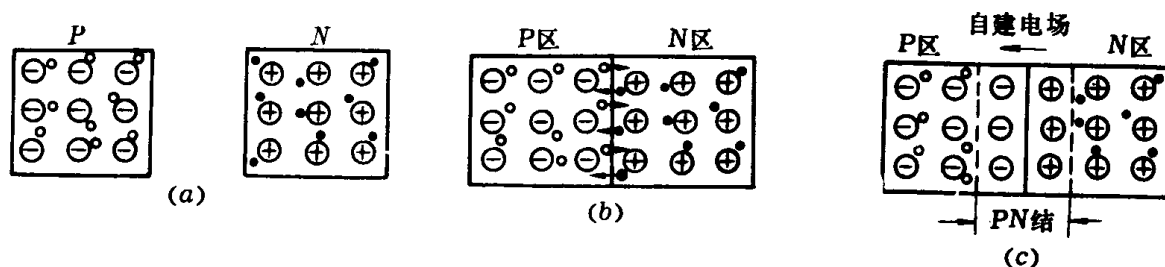


图 1-10 PN 结的形成

图1-10 (a) 是单独的 P 型和 N 型半导体（注意，图中省略了少数载流子， P 型和 N 型半导体都是电中性的）。图1-10 (b) 是把 P 型和 N 型半导体刚接合在一起的情况，这时，由于两边多数载流子的类型不同，在交界面处存在着电子和空穴的浓度差，因此， P 区中的空穴要向空穴浓度很小的 N 区扩散， N 区中的自由电子要向自由电子浓度很小的 P 区扩散。 P 区中空穴扩散到 N 区，使 P 区中空穴减少，在 P 区的边界附近露出带负电的受主离子而呈现负电。同时，扩散到 N 区的空穴在 N 区边界附近与电子复合，使 N 区的边界附近因失去电子露出带正电的施主离子而呈现正电。同理， N 区中的电子扩散到 P 区，也使 P 区边界呈现负电， N 区边界呈现正电。这样，在交界面的两边分别出现了由正、负离子组成的空间电荷区，如图1-10所示。这一层空间电荷区就叫做 PN 结。由于这空间电荷区内的多数载流子都被复合掉，所以空间电荷区也叫做耗尽层。空间电荷区是很薄的，仅有几微米~几十微米。

空间电荷区的 P 区一边带负电荷、 N 区一边带正电荷，形成一个从 N 区指向 P 区的电

场。这个电场是由多数载流子的扩散而形成的，并且只存在于 PN 结内部，所以叫做 PN 结的自建电场。自建电场的出现，既阻碍 P 区中的空穴向 N 区扩散，也阻碍 N 区中的自由电子向 P 区扩散，又使 P 区和 N 区中的少数载流子形成漂移电流，漂移电流的方向与多数载流子的扩散电流方向相反。当 PN 结刚开始形成时，自建电场还很弱，漂移电流很小，此时多数载流子的扩散运动占绝对优势。随着扩散不断地进行，空间电荷区不断增厚，自建电场逐渐加强，漂移电流则愈来愈大。当漂移电流增大到和扩散电流相等时，流过 PN 结的净电流为零，交界面两边的载流子将既不增加、也不减少，达到动态平衡。此时，空间电荷区的厚度便不再增加，自建电场的强度亦维持一定的大小。这时候的 PN 结叫做平衡 PN 结。

在平衡 PN 结中， P 区的电位比 N 区的电位低， P 区和 N 区之间有一定的电位差，叫做 PN 结自建电位差。自建电位差的大小与 PN 结的材料性质和温度有关， P 区和 N 区的杂质浓度愈大，温度愈低，自建电位差愈大。在室温下，硅 PN 结的自建电位差约为 $0.6 \sim 0.8$ 伏，锗 PN 结的自建电位差约为 $0.2 \sim 0.4$ 伏。硅 PN 结的自建电位差比锗的大，这是因为硅材料的本征载流子浓度比锗的约小一千倍左右，硅 PN 结中少数载流子比锗 PN 结中的少得多，所以，在扩散和漂移达到动态平衡时，硅 PN 结的自建电位差就比较大。

二、 PN 结的单向导电特性

PN 结是充满着不能参与导电的受主离子和施主离子，它的电阻率很高，通常也把它叫做阻挡层。由于阻挡层的电阻比它两边的 P 区和 N 区的电阻大得多，在 P 、 N 区两端外加一电压后，外加电压将集中降落于阻挡层上，阻挡层将变厚（电阻增大）或变薄（电阻减小）而呈现出单向导电特性。

1. 外加正向电压

PN 结上外加正向电压（简称正向偏置），就是把 P 区接电源正极， N 区接电源负极形成一个电路，如图1-11（a）所示。加上正向电压后，由于外电场方向与 PN 结自建电场的方向相反，漂移电流将减小，原来扩散电流与漂移电流相等的平衡状态遭到破坏，其结果是有一从 P 区流向 N 区的电流，这个电流叫做 PN 结的正向电流。

PN 结正向偏置时， P 区中的空穴不断注入 N 区， N 区中的电子不断注入 P 区。注入 N 区的空穴在向 N 区纵深方向扩散的过程中将与 N 区中的电子复合，同样，注入 P 区的电子在向 P 区纵深方向扩散的过程中与 P 区中的空穴复合。与此同时，电源不断地向 N 区“输入”自由电子以补充因扩散和复合而失去的自由电子，并从 P 区不断地“抽取”自由电子以补充 P 区失去的空穴，从而维持正向电流连续不断地流过电路。

由于平衡 PN 结的自建电位差不到一伏，外加电压只要有零点几伏就可以大大削弱自建电场的阻挡作用。随着外加正向电压的增大，正向电流将迅速增加，这时 PN 结表现出较小的正向电阻而处于导通状态。

应当指出， PN 结正向偏置时，外加电压驱使 P 区中的空穴和 N 区中的电子漂移进入阻挡层，并分别与其中一部分受主离子和施主离子的电量中和，从而抵销了一部分空间电荷使阻挡层变薄，如图1-11（a）中阻挡层由 d_1 减小为 d_2 。高阻率的阻挡层的厚度在外加正向电压作用下变薄，所以正向 PN 结呈现较小的电阻，一般为几欧～几百欧，甚至更小。

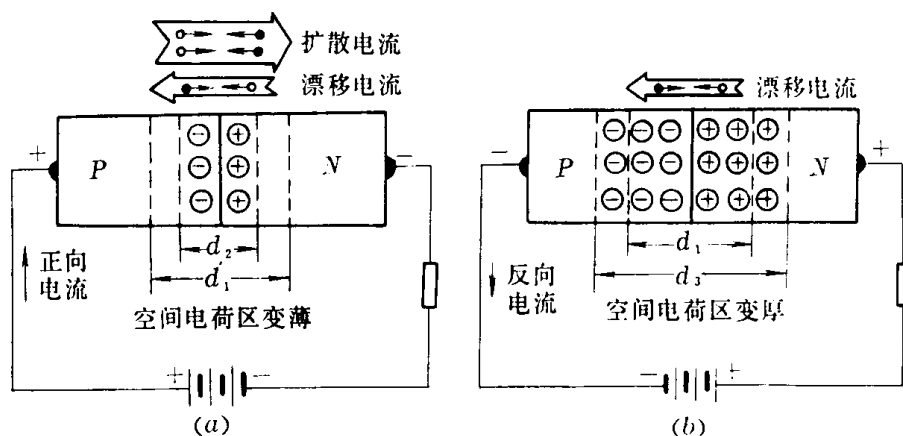


图 1-11 PN 结的单向导电

(a) 外加正向电压 PN 结导通;
(b) 外加反向电压 PN 结截止

2. 外加反向电压

PN 结上外加反向电压(简称反向偏置),就是把 P 区接电源负极, N 区接电源正极形成一个电路,如图1-11 (b) 所示。在这种情况下,外加电场的方向与 PN 结自建电场的方向相同, PN 结内的电场强度增大,从而加强了空间电荷区内少数载流子的漂移运动,大大削弱了多数载流子的扩散运动。外加很小的反向电压(≤ 1 伏),就可以使多数载流子的扩散运动无法继续下去,扩散电流为零,此时,只有少数载流子的漂移电流从 N 区流向 P 区,这个电流叫做 PN 结的反向电流。由于本征激发产生的少数载流子的浓度很小,所以反向电流是很小的(微安级),这时 PN 结表现出很大的反向电阻,可以认为处于截止(不导通)状态。

在 PN 结反向偏置时,外加反向电压驱使 P 区中靠近阻挡层的空穴和 N 区中靠近阻挡层的电子远离阻挡层,使 P 区中出现更多的受主离子、 N 区中出现更多的施主离子,阻挡层变厚,如图1-11 (b) 中阻挡层由 d_1 增大到 d_3 。高阻率的阻挡层的厚度在外加反向电压作用下变厚,所以反向 PN 结呈现很大的电阻,一般可达几十千欧~十几兆欧。

综上所述, PN 结在正向偏置时,呈现很小的正向电阻而处于导通状态, PN 结中流过较大的正向电流(由 P 区流向 N 区)。 PN 结反向偏置时,呈现很大的反向电阻, PN 结基本上不导电而处于截止状态,仅流过很小的由 N 区流向 P 区的反向电流。 PN 结在正向电压作用下表现为低电阻,在反向电压作用下表现为高电阻,这就叫做 PN 结的单向导电特性,或者叫做 PN 结的整流特性。 PN 结这个最基本的特性,是制造许多半导体器件的理论依据。

三、 PN 结的击穿

1. 电击穿

实验表明, PN 结上外加不大的反向电压时,反向电流是很小的,而且反向电流的大小几乎与反向电压的大小无关,所以通常把这时的反向电流叫做反向饱和电流。但是,反向电压达到一定数值时,反向电流会突然迅速地增大,这种现象叫做 PN 结的电击穿,如

图1-12所示。发生电击穿所需的反向电压 U_B^- 叫做击穿电压。

若击穿时的电流被控制在较小数值, PN 结的击穿一般是可以恢复的, 即将反向电压降低到击穿电压值以下, PN 结便可重新恢复到反向高阻状态。若击穿时外电路中设有适当的限流电阻来限制击穿电流, PN 结将因击穿电流过大而被烧毁。

PN 结的电击穿有两种类型, 即雪崩击穿和齐纳击穿(又叫隧道击穿)。

(1) 雪崩击穿 雪崩击穿是一种因碰撞电离使载流子如雪崩般地大量增加而引起的电击穿。

加在 PN 结上的反向电压增大, 阻挡层中的电场强度便随着增大, 当场强达到 10^5 伏/厘米以上时, 阻挡层中的本征载流子将在此强电场作用下加速而获得很大的动能, 并与阻挡层中的原子发生碰撞, 使共价键中的价电子挣脱束缚而变成自由电子, 同时产生一个空穴, 即产生一对电子-空穴对。新产生的载流子和原来的载流子在强电场作用下重复上述的碰撞过程, 阻挡层中的载流子便如雪崩般地增加, 反向电流迅速增大, 从而导致 PN 结的电击穿。

(2) 齐纳击穿 与雪崩击穿的原因不同, 齐纳击穿是依靠阻挡层中的强电场(约 10^6 伏/厘米)直接把原子中的价电子“拉”出来成为载流子。这种情况叫做场致激发。场致激发可以产生大量的电子-空穴对, 使反向电流迅速增大而导致击穿。

齐纳击穿一般发生在较薄的阻挡层中, 因为在相同的外加电压作用下, 阻挡层愈薄, 则其中的场强就愈大, 场致激发容易产生。雪崩击穿一般发生在较厚的阻挡层中, 由于阻挡层较厚, 载流子在漂移过程中与阻挡层中的原子碰撞机会较多。

一般情况下, PN 结的电击穿是有害的, 但是稳压管(又叫齐纳二极管)正是利用 PN 结的电击穿特性而制成的。

2. 热击穿

热击穿是由于 PN 结的温度不断上升而引起的。当反向电压比较高时, 反向电流流过 PN 结将产生较大的功率损耗, 引起 PN 结的温度升高。温度升高使本征激发增强, 载流子浓度增加, 使反向电流增大, 反向电流的增大又促使 PN 结的温度进一步上升。若散热情况不良, 这个过程将继续下去, 反向电流将急剧增大, 使 PN 结击穿并被烧毁。热击穿是一种不能恢复的破坏性击穿。

四、 PN 结的电容

如前所述, PN 结具有很好的单向导电特性, 但这只是在直流(或低频)电压下才如此。随着工作频率的增高, PN 结的单向导电性会愈来愈差, 亦即 PN 结的反向阻抗是随着工作频率的增高而减小的, 当工作频率增大到某一数值时, 反向阻抗会减小到和正向阻抗一样。这时, PN 结的单向导电性也就消失了。因为 PN 结本身具有电容, PN 结的阻抗实际上是 PN 结的非线性电阻 r 和电容 C 并联的等效阻抗, 如图1-13所示。低频时 PN

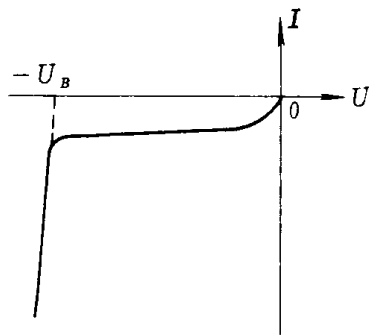


图 1-12 PN 结的击穿