

● 高等学校教材

# 电工学

● [第四版]  
● 下册

## 电子技术

● 秦曾煌 主编

2

高等教育出版社

TM11

Q53-2

(4) 2 高等学校教材

# 电 工 学

(第四版)

下 册

## 电 子 技 术

秦曾煌 主编

高等教育出版社

本书(第四版)是根据1987年国家教育委员会颁发的高等工业学校“电工技术(电工学 I)”和“电子技术(电工学 II)”两门课程的教学基本要求修订的。全书分上下两册出版。上册是电工技术部分;下册是电子技术部分。每章均附有习题。可作为高等工业学校上述两门课程的教材,也可供工程技术人员参考。

本书(第四版)下册由大连理工大学蒋德川、唐介、赵宗武同志审阅。

本书责任编辑 刘秉仁

(京)112号

高等学校教材  
**电 工 学**  
(第 四 版)  
下 册  
**电 子 技 术**  
秦曾煌 主编

高等教育出版社出版  
新华书店总店北京科技发行所发行  
人民教育出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 12.625 字数 300 000  
1965年2月第1版 1990年9月第4版 1992年9月第5次印刷

印数186 636—228 146

ISBN 7-04-003141-8/ I·M·162

定价 4.15 元

# 目 录

(带 \* 的章节为加深加宽内容)

## 下篇 电子技术

<b>第十五章 半导体二极管和三极管</b> .....	1
15-1. 半导体的导电特性.....	1
一、本征半导体.....	2
二、N型半导体和P型半导体.....	4
15-2. PN结.....	6
一、PN结的形成.....	6
二、PN结的单向导电性.....	8
15-3. 半导体二极管.....	10
一、基本结构.....	10
二、伏安特性.....	11
三、主要参数.....	12
15-4. 稳压管.....	14
15-5. 半导体三极管.....	17
一、基本结构.....	17
二、电流分配和放大原理.....	19
三、特性曲线.....	23
四、主要参数.....	25
习题.....	30
<b>第十六章 基本放大电路</b> .....	33
16-1. 基本放大电路的组成.....	33
16-2. 放大电路的静态分析.....	36
一、用放大电路的直流通路确定静态值.....	37

二、用图解法确定静态值	37
16-3. 放大电路的动态分析	40
一、微变等效电路法	40
二、图解法	48
16-4. 静态工作点的稳定	53
16-5. 射极输出器	59
一、静态分析	59
二、动态分析	60
16-6. 放大电路中的负反馈	63
一、什么是放大电路中的负反馈	63
二、负反馈的类型	64
三、负反馈对放大电路工作性能的影响	70
16-7. 多级放大电路及其级间耦合方式	77
一、阻容耦合	78
二、直接耦合	83
16-8. 差动放大电路	90
一、差动放大电路的工作情况	90
二、典型差动放大电路	94
16-9. 互补对称功率放大电路	102
一、对功率放大电路的基本要求	102
二、互补对称放大电路	104
16-10. 场效应管及其放大电路	110
一、绝缘栅场效应管	111
二、场效应管放大电路	117
*16-11. 分立元件放大电路应用举例	123
一、JB-1B型晶体管毫伏计中的放大电路	123
二、扩音机放大电路	124
习题	125

---

<b>第十七章 集成运算放大器</b> .....	133
17-1. 集成运算放大器的简单介绍.....	133
一、集成运算放大器的特点.....	134
二、电路的简单说明.....	135
三、主要参数.....	136
四、理想运算放大器及其分析依据.....	139
17-2. 运算放大器在信号运算方面的应用.....	141
一、比例运算.....	141
二、加法运算.....	145
三、减法运算.....	146
四、积分运算.....	147
五、微分运算.....	150
17-3. 运算放大器在信号处理方面的应用.....	152
一、有源滤波器.....	152
二、采样保持电路.....	154
三、电压比较器.....	155
*17-4. 运算放大器在波形产生方面的应用.....	158
一、矩形波发生器.....	158
二、三角波发生器.....	159
三、锯齿波发生器.....	160
*17-5. 运算放大器在信号测量方面的应用.....	161
17-6. 使用运算放大器应注意的几个问题.....	164
一、选用元件.....	164
二、消振.....	164
三、调零.....	164
四、保护.....	165
五、扩大输出电流.....	166
习题.....	166
<b>第十八章 正弦波振荡电路</b> .....	174

18-1. 自激振荡	174
18-2. $LC$ 振荡电路	178
一、工作原理	178
二、三点式振荡电路	181
*三、应用举例——半导体接近开关	182
18-3. $RC$ 振荡电路	184
习题	187
<b>第十九章 直流稳压电源</b>	<b>189</b>
19-1. 整流电路	190
一、单相半波整流电路	190
二、单相桥式整流电路	192
*三、三相桥式整流电路	195
19-2. 滤波器	200
一、电容滤波器( $C$ 滤波器)	200
二、电感电容滤波器( $LC$ 滤波器)	203
三、 $\pi$ 形滤波器	204
19-3. 稳压管稳压电路	206
19-4. 串联型晶体管稳压电路	207
19-5. 集成稳压电源	209
习题	212
<b>第二十章 晶闸管和可控整流电路</b>	<b>217</b>
20-1. 晶闸管	217
一、基本结构	217
二、工作原理	218
三、伏安特性	221
四、主要参数	223
20-2. 可控整流电路	225
一、单相半波可控整流电路	225
二、单相半控桥式整流电路	229

20-3. 晶闸管的保护	232
一、晶闸管的过电流保护	232
二、晶闸管的过电压保护	234
20-4. 单结晶体管触发电路	235
一、单结晶体管	235
二、单结晶体管触发电路	238
*20-5. 应用举例——晶闸管直流调速系统	244
一、反馈方式	244
二、调速系统实例	246
习题	248
<b>第二十一章 门电路和组合逻辑电路</b>	<b>250</b>
21-1. 脉冲信号	250
21-2. 晶体管的开关作用	252
21-3. 分立元件门电路	256
一、门电路的基本概念	256
二、二极管“与”门电路	258
三、二极管“或”门电路	260
四、晶体管“非”门电路	261
21-4. TTL门电路	264
一、TTL“与非”门电路	264
二、主要参数	266
三、三态输出“与非”门电路	269
21-5. MOS门电路	271
一、NMOS 门电路	272
二、CMOS 门电路	273
21-6. 组合逻辑电路的分析和综合	276
一、逻辑代数运算法则	278
二、组合逻辑电路的分析和综合	281
21-7. 加法器	285



一、二进制	285
二、半加器	286
三、全加器	288
21-8. 编码器	290
一、二进制编码器	290
二、二十进制编码器	292
21-9. 译码器和数字显示	294
一、二进制译码器	294
二、二十进制显示译码器	295
习题	298
<b>第二十二章 触发器和时序逻辑电路</b>	<b>304</b>
22-1. 双稳态触发器	304
一、 $R-S$ 触发器	304
二、 $J-K$ 触发器	310
三、触发器逻辑功能的转换	315
22-2. 寄存器	317
一、数码寄存器	318
二、移位寄存器	319
22-3. 计数器	321
一、二进制计数器	321
二、十进制计数器	326
22-4. 单稳态触发器	330
一、CMOS 积分型单稳态触发器	330
二、由 555 集成定时器组成的单稳态触发器	332
22-5. 多谐振荡器	336
一、 $RC$ 环形多谐振荡器	336
二、由 555 集成定时器组成的多谐振荡器	338
*22-6. 应用举例	340
一、优先裁决电路	340

---

二、冲床保安电路	340
三、采样脉冲整形电路	341
四、数字测速系统	342
五、温度控制电路	343
习题	344
<b>第二十三章 模拟量和数字量的转换</b>	<b>351</b>
23-1. 数模转换器	352
一、T形电阻网络数模转换器	352
二、数模转换器的主要技术指标	358
23-2. 模数转换器	359
一、逐次逼近型模数转换器	359
二、模数转换器的主要技术指标	366
习题	366
<b>附录</b>	<b>368</b>
附录一 半导体器件型号命名方法	368
附录二 常用半导体器件的参数	370
附录三 集成电路型号命名	381
附录四 电阻器标称阻值系列	383
<b>部分习题答案</b>	<b>384</b>
<b>中英名词对照</b>	<b>387</b>

# 下篇 电子技术

## 第十五章 半导体二极管和三极管

自1948年第一个晶体管问世以来,半导体技术有了飞跃的发展。由于半导体器件具有重量轻、体积小、耗电少、寿命长、工作可靠等突出优点,在现代农业、现代工业、现代科学技术和现代国防中获得了广泛的应用。

半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础,而PN结又是构成各种半导体器件的共同基础。因此,本章从讨论半导体的导电特性和PN结的基本原理(特别是它的单向导电性)开始,然后介绍二极管和三极管,为以后的学习打下基础。

### 15-1. 半导体的导电特性

所谓半导体,顾名思义,就是它的导电能力介乎导体和绝缘体之间。如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。

很多半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。例如有些半导体对温度的反应特别灵敏,环境温度增高时,它的导电能力要增强很多。利用这种特性就做成了各种热敏元件。又如有些半

导体(如硫化镉)受到光照时,它的导电能力变得很强;当无光照时,又变得象绝缘体那样不导电。利用这种特性就做成了各种光电元件。

更重要的是,如果在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后,它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。例如在纯硅中掺入百万分之一的硼后,硅的电阻率就从大约  $2 \times 10^8 \Omega \cdot m$  减小到  $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$  左右。利用这种特性就做成了各种不同用途的半导体器件,如半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管等。

半导体何以有如此悬殊的导电特性呢?根本原因在于事物内部的特殊性。下面简单介绍一下半导体物质的内部结构和导电机理。

### 一、本征半导体

用得最多的半导体是锗和硅。图 15-1 是锗和硅的原子结构图,它们各有四个价电子,都是四价元素。将锗或硅材料提纯(去

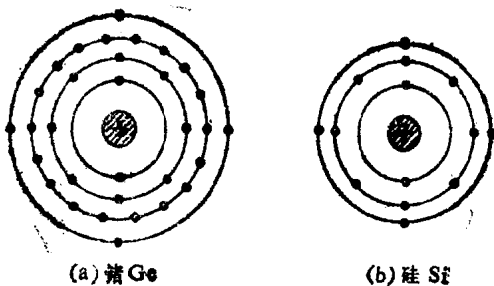


图 15-1 锗和硅的原子结构

掉无用杂质)并形成单晶体后,所有原子便基本上整齐排列,其立体结构图与平面示意图分别如图 15-2 和图 15-3 所示。半导体一般都具有这种晶体结构,所以半导体也称为晶体,这就是晶体管名称的由来。

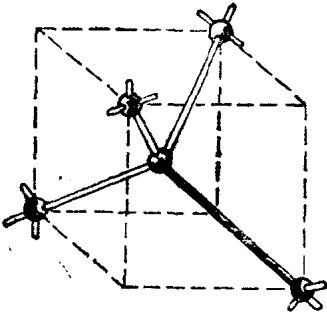


图 15-2 晶体中原子的排列方式

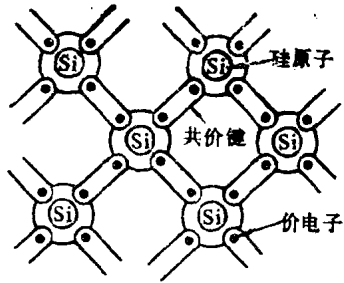


图 15-3 硅单晶中的共价键结构

本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。

在本征半导体的晶体结构中，每一个原子与相邻的四个原子结合。每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对。这对价电子是每两个相邻原子共有的，它们把相邻的原子结合在一起，构成所谓共价键的结构。

在共价键结构中，原子最外层虽然具有八个电子而处于较为稳定的状态，但是共价键中的电子还不象在绝缘体中的价电子被束缚得那样紧，在获得一定能量(温度增高或受光照)后，即可挣脱原子核的束缚(电子受到激发)，成为自由电子。温度愈高，晶体中产生的自由电子便愈多。

在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，称为空穴。在一般情况下，原子是中性的。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，原子的中性便被破坏，而显出带正电。

在外电场的作用下，有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子，填补这个空穴。同时，在失去了一个价电子的相邻原子的共价键中出现另一个空穴，它也可以由相邻原子中的价电子来递补，而在该原子中又出现一个空穴，如图 15-4 所示。如此继续下去，

就好象空穴在运动<sup>①</sup>。而空穴运动的方向与价电子运动的方向相反，因此空穴运动相当于正电荷的运动。

因此，当半导体两端加上外电压时，半导体中将出现两部分电流：一是自由电子作定向运动

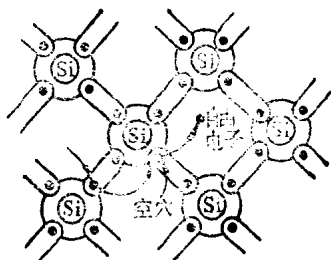


图 15-4 空穴和自由电子的形成

所形成的电子电流，一是仍被原子核束缚的价电子(注意，不是自由电子)递补空穴所形成的空穴电流。在半导体中，同时存在着电子导电和空穴导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

自由电子和空穴都称为载流子。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现，同时又不断复合。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，于是半导体中的载流子(自由电子和空穴)便维持一定数目。温度愈高，载流子数目愈多，导电性能也就愈好。所以，温度对半导体器件性能的影响很大。

## 二、N型半导体和P型半导体

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量极少，导电能力仍然很低。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素)，这将使掺杂后的半导体(杂质半导体)的导电性能大大增强。

由于掺入的杂质不同，杂质半导体可分为两大类。

一类是在硅或锗的晶体中掺入磷(或其它五价元素)。磷原子的最外层有五个价电子(图 15-5)。由于掺入硅晶体的磷原子数

<sup>①</sup> 这种情况好比剧场中前座的观众走了出现了空位，后座的观众移前递补空位，这就好象空位在向后移动一样。

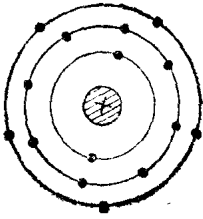


图 15-5 磷原子的结构

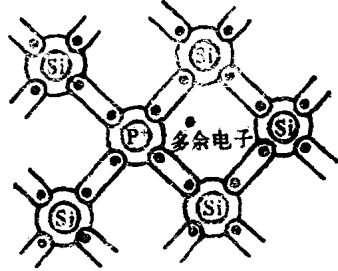


图 15-6 硅晶体中掺磷出现自由电子

比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子参加共价键结构只需四个价电子,多余的第五个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子(图 15-6)①。于是半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为电子半导体或N型半导体。例如在室温  $27^{\circ}\text{C}$  时,每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴  $1.5 \times 10^{10}$  个,掺杂后成为 N 型半导体,其自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会,空穴数目便减少到每立方厘米  $2.3 \times 10^5$  个以下。故在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子,而空穴则是少数载流子。

另一类是在硅或锗晶体中掺入硼(或其它三价元素)。每个硼

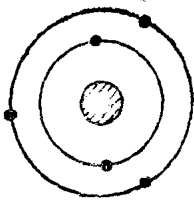


图 15-7 硼原子的结构

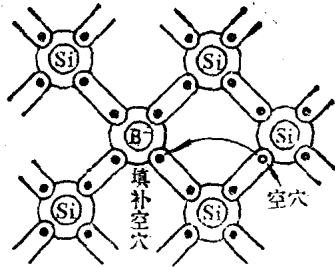


图 15-8 硅晶体中掺硼出现空穴

① 磷原子失去一个电子而成为正离子。

原子只有三个价电子(图 15-7), 故在构成共价键结构时, 将因缺少一个电子而形成空穴(图 15-8)①。这样, 在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或 P 型半导体, 其中空穴是多数载流子, 自由电子是少数载流子。

应注意, 不论是 N 型半导体还是 P 型半导体, 虽然它们都有一种载流子占多数, 但是整个晶体仍然是不带电的。

### 【练习与思考】

15-1-1. 电子导电和空穴导电有什么区别? 空穴电流是不是由自由电子递补空穴所形成的?

15-1-2. 杂质半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样产生的? 为什么杂质半导体中少数载流子的浓度比本征载流子的浓度小?

15-1-3. N 型半导体中的自由电子多于空穴, 而 P 型半导体中的空穴多于自由电子, 是否 N 型半导体带负电, 而 P 型半导体带正电?

## 15-2. PN 结

P 型或 N 型半导体的导电能力虽然大大增强, 但不能直接用来制造半导体器件。通常是在一块晶片上, 采取一定的掺杂工艺措施, 在两边分别形成 P 型半导体和 N 型半导体, 它们的界面就形成 PN 结。这 PN 结是构成各种半导体器件的基础。PN 结如此之重要, 那么它是怎样形成的, 有何特性呢?

### 一、PN 结的形成

图 15-9 所示的是一块晶片, 两边分别形成 P 型和 N 型半导体。图中  $\ominus$  代表得到一个电子的三价杂质(例如硼)离子, 带负电;

① 硼原子得到一个电子而成为负离子。



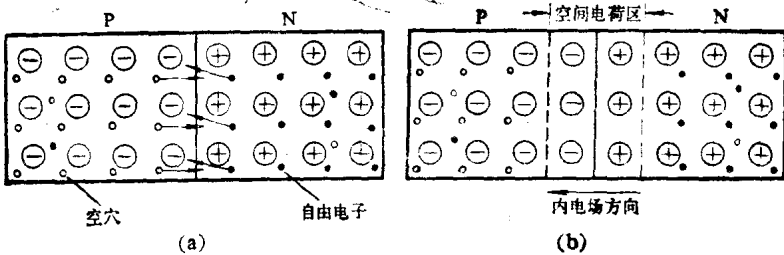


图 15-9 PN 结的形成

⊕代表失去一个电子的五价杂质(例如磷)离子,带正电。由于P区有大量空穴(浓度大),而N区的空穴极少(浓度小),因此空穴要从浓度大的P区向浓度小的N区扩散。首先是交界面附近的空穴扩散到N区,在交界面附近的P区留下一些带负电的三价杂质离子,形成负空间电荷区。同样,N区的自由电子要向P区扩散,在交界面附近的N区留下带正电的五价杂质离子,形成正空间电荷区。这样,在P型半导体和N型半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区,这个空间电荷区就是PN结。

形成空间电荷区的正负离子虽然带电,但是它们不能移动,不参与导电,而在这区域内,载流子极少,所以空间电荷区的电阻率很高。此外,这区域内多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,所以空间电荷区有时称为耗尽层。

正负空间电荷在交界面两侧形成一个电场,称为内电场,其方向从带正电的N区指向带负电的P区,如图15-9(b)所示。由P区向N区扩散的空穴在空间电荷区将受到内电场的阻力,而由N区向P区扩散的自由电子也将受到内电场的阻力,即内电场对多数载流子(P区的空穴和N区的自由电子)的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层。

空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用。