

高等学校教材

电 工 学

(1981年修订本)

中 册

秦曾煌 主编

高等教育出版社

高等学校教材

电 工 学

(1981年修订本)

中 册

秦曾煌 主编

高等教育出版社

本书(1981年修订本)是参考 1980 年修订的高等工业学校《电工学教学大纲(草案)》(150学时)修订的。全书分三册出版。上册是电路与磁路部分;中册是电子技术部分;下册是电机与控制部分。每章均附有习题。

参加本书中册(第一版)编写的有吴项、魏富珍、秦曾煌、柳焯、郭文安、向延棣同志。本书(1981年修订本)中册是由秦曾煌同志改写和修订的。

本书(1981年修订本)中册由大连工学院蒋德川、周武禄、赵宗武同志审阅,并经高等学校工科电工学教材编审小组复审通过,可作为高等工业学校电工学课程(150学时)的教材,也可供工程技术人员参考。

本书责任编辑 王缉惠

高等学校教材
电 工 学
(1981年修订本)
中 册
秦曾煌 主编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北 京 印 刷 三 厂 印 装

*

开本850×1168 1/32 印张10.875 字数250 000
1979年3月第1版 1981年11月第2版 1990年7月第20次印刷

印数 1 419 241—1 430 260

ISBN 7-04-001549-8/TM·60

定价 2.50元

目 录

(带“*”的章节为加深加宽内容)

第二部分 电子技术

第八章 半导体二极管和三极管	1
8-1. 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
8-2. PN 结	6
一、 PN 结的形成	6
二、 PN 结的单向导电性	7
8-3. 半导体二极管	9
一、基本结构	9
二、伏安特性	10
三、主要参数	11
8-4. 稳压管	13
8-5. 半导体三极管	15
一、基本结构	15
二、电流分配和放大原理	16
三、特性曲线	21
四、主要参数	23
习题	28
第九章 交流放大电路	32
9-1. 基本交流放大电路的组成	32
9-2. 放大电路的图解法	35
一、静态分析	35
二、输出端开路时的动态分析	38
三、输出端接有负载时的动态分析	42
四、非线性失真	45

9-3. 静态工作点的稳定	46
一、温度对静态工作点的影响	47
二、分压式偏置电路	49
9-4. 放大电路的微变等效电路法	53
一、晶体管的微变等效电路	54
二、电压放大倍数的计算	55
三、放大电路输入电阻和输出电阻的计算	60
9-5. 阻容耦合放大电路	62
9-6. 放大电路中的负反馈	68
一、什么是负反馈	69
二、负反馈的类型	70
三、反馈的判别	75
四、负反馈对放大电路工作性能的影响	77
9-7. 射极输出器	84
9-8. 功率放大电路	87
一、变压器耦合的功率放大电路	87
*二、无变压器的功率放大电路	94
习题	97
第十章 场效应管放大电路	107
10-1. 结型场效应管	107
一、基本结构和栅极的控制作用	107
二、特性曲线和主要参数	110
10-2. 绝缘栅场效应管	112
一、 N 沟道增强型绝缘栅场效应管	112
二、 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管	115
10-3. 场效应管放大电路	118
一、自给偏压偏置电路	119
二、分压式偏置电路	119
习题	122
第十一章 直流放大电路和运算放大器	125
11-1. 直流放大电路的直接耦合	126
一、前级与后级静态工作点的相互影响	126
二、零点漂移	130

11-2. 差动放大电路	131
一、差动放大电路的工作情况	131
二、典型差动放大电路	134
三、晶体管恒流源差动放大电路	142
11-3. 运算放大器	144
一、集成运算放大器的简单介绍	145
二、运算放大器的基本运算电路	151
*三、应用举例	160
习题	163
第十二章 正弦波振荡电路	172
12-1. 自激振荡	172
12-2. <i>LC</i> 振荡电路	176
一、工作原理	176
二、基本电路	178
*三、应用举例——半导体接近开关	180
12-3. <i>RC</i> 振荡电路	181
习题	184
第十三章 脉冲数字电路	186
13-1. 脉冲信号	188
13-2. 晶体管的开关作用	189
13-3. 基本逻辑门电路	193
一、基本概念	193
二、二极管“与”门电路	196
三、二极管“或”门电路	197
四、晶体管“非”门电路	198
13-4. 晶体管-晶体管逻辑(<i>TTL</i>)“与非”门电路	201
一、工作原理	201
二、主要参数	203
*13-5. 高阈值逻辑(<i>HTL</i>)“与非”门电路	206
*13-6. <i>MOS</i> 逻辑门电路	208
一、 <i>NMOS</i> 门电路	208
二、 <i>CMOS</i> 门电路	209
13-7. 逻辑门电路的组合	211

一、已知逻辑图,分析逻辑功能	211
*二、已知逻辑要求,画出逻辑图	212
13-8. 双稳态触发器	214
一、 $R-S$ 触发器	215
二、 $J-K$ 触发器(主从型)	220
三、 D 触发器(维持阻塞型)	225
四、触发器逻辑功能的转换	228
13-9. 寄存器	229
一、并行输入并行输出寄存器	230
二、串行输入串行输出寄存器	231
13-10. 计数器	232
一、二进制计数器	233
二、十进制计数器	236
13-11. 译码器和数码显示器	239
一、辉光数码管译码显示电路	239
*二、荧光数码管译码显示电路	242
*13-12. 单稳态触发器	245
*13-13. 无稳态触发器	247
*13-14. 模拟量和数字量的转换	248
一、数-模转换器	249
二、模-数转换器	251
习题	254

第十四章 整流电路和直流稳压电源 260

14-1. 整流电路	261
一、单相半波整流电路	261
二、单相全波整流电路	263
三、单相桥式整流电路	265
*四、三相桥式整流电路	268
14-2. 滤波器	273
一、电容滤波器	273
二、电感电容滤波器	276
三、 π 型滤波器	277
14-3. 稳压管稳压电路	278

*14-4. 串联式晶体管稳压电路	281
习题	284
第十五章 可控硅整流电路	287
15-1. 可控硅	287
一、基本结构	287
二、工作原理	288
三、伏安特性	291
四、主要参数	292
15-2. 可控整流电路	294
一、单相半波可控整流电路	294
二、单相半控桥式整流电路	298
15-3. 可控硅的保护	300
一、可控硅的过电流保护	301
二、可控硅的过电压保护	302
15-4. 单结晶体管触发电路	303
一、单结晶体管	303
二、单结晶体管触发电路	306
习题	310
附录	313
附录一 半导体器件型号命名方法	313
附录二 常用半导体器件的参数	315
附录三 集成电路型号命名	322
附录四 电阻器标称阻值系列	323
附录五 布尔代数运算法则	324
习题答案	326
中英名词对照	331

第二部分 电子技术

第八章 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, 为后面打下基础。

8-1. 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很灵敏, 环境温度增高时, 它的导电能力要增强不少。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 20×10^8 欧·毫米²/米减小到 4000 欧·毫米²/米左右。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、场效应管及可控硅等。

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 8-1 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

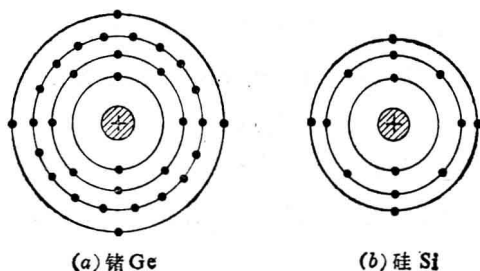


图 8-1 锗和硅的原子结构

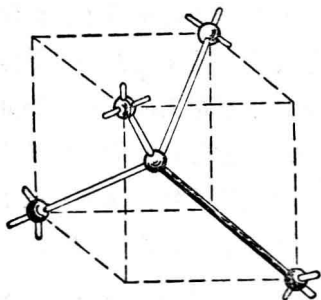


图 8-2 晶体中原子的排列方式

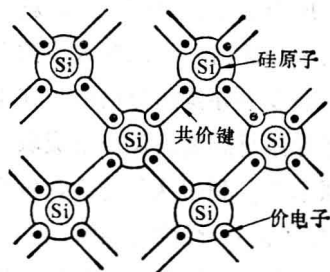


图 8-3 硅单晶中的共价键结构

体结构图与平面示意图分别如图 8-2 和图 8-3 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。

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,共价键中的电子即可挣脱原子核的束缚,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。或者说,原子中出现了带正电的空穴,如图 8-4 所示。在这种情况下,晶体中的自由电子(带负电)和空穴(带正电)必然成对出现,数量相等。

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

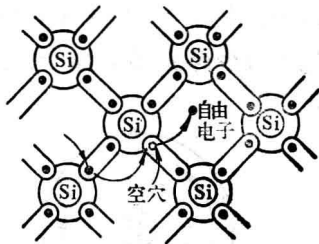


图 8-4 空穴和自由电子的形成

现一个空穴。如此继续下去,就好像带正电的粒子(空穴)在运动。因此可用空穴运动产生的电流来代替价电子运动产生的电流,但

两者的运动方向相反。

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 8-5)。由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上

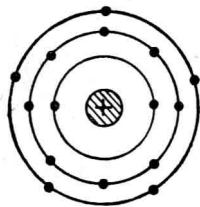


图 8-5 磷原子的结构

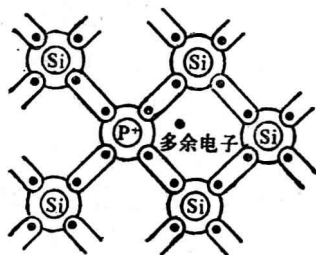


图 8-6 硅晶体中掺磷出现自由电子

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 8-6)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°C 时，每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{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 2.3×10^5 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)。每个硼只有三个价电子(图 8-7)，故在构成共价键结构时，将因缺少

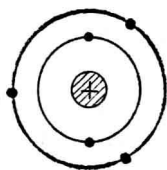


图 8-7 硼原子的结构

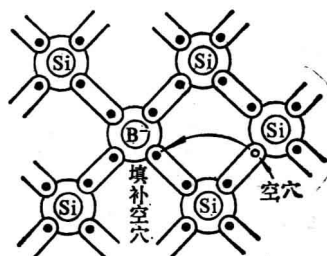


图 8-8 硅晶体中掺硼出现空穴

一个电子而形成一个空穴(图 8-8)②。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。

① 磷原子失去一个电子而成为正离子。

② 硼原子得到一个电子而成为负离子。

8-2. PN 结

P 型或 N 型半导体的导电能力虽然大大增强,但并不能直接用来制造半导体器件。通常是在一块晶片上,采取一定的工艺措施,在两边掺入不同的杂质,分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,它们的交界面就形成 PN 结。而这 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 8-9 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; $\oplus$ 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

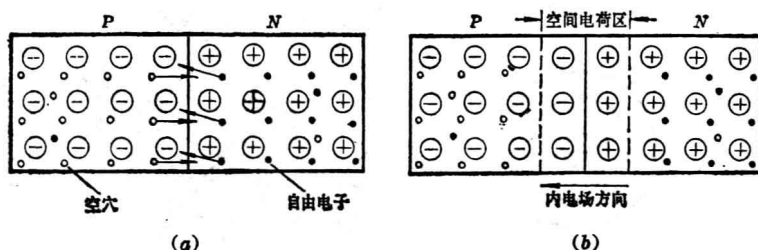


图 8-9 PN 结的形成

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 8-9b 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,这是一个方面。但另一方面,内电场对少数载流子(P 区的自由电子和 N 区的空穴)则可推动它们越过空间电荷区,进入对方。这种少数载流子在电场作用下有规则的运动称为漂移运动。

扩散和漂移是互相联系,又是互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时,多数载流子的扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐步加强。于是在一定条件下(例如温度一定),多数载流子的扩散运动逐渐减弱,而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡。也就是如图 8-10 中所示的那样, P 区的空穴(多数载流子)向右扩散的数量与 N 区的空穴(少数载流子)向左漂移的数量相等;对自由电子讲也是这样。达到平衡后,空间电荷区的宽度基本上稳定下来, PN 结就处于相对稳定的状态。

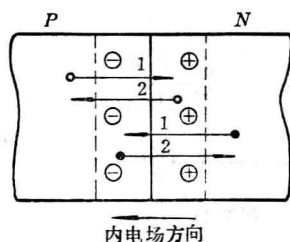


图 8-10 扩散运动与漂移运动达到平衡: 1—多数载流子扩散运动的方向; 2—少数载流子漂移运动的方向

二、 PN 结的单向导电性

上面讨论的是 PN 结在没有外加电压时的情况, 这时半导体

中的扩散和漂移处于动态平衡。下面讨论在 PN 结上加外部电压的情况。

如果在 PN 结上加正向电压,即外电源的正端接 P 区,负端接 N 区(图 8-11)。由图可见,外电场与内电场的方向相反,因此扩散与漂移运动的平衡被破坏。外电场驱使 P 区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷,同时 N 区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷。于是,整个空间电荷区变窄,内电场被削弱,多数载流子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流(正向电流)。在一定范围内,外电场愈强,正向电流(由 P 区流向 N 区的电流)愈大,这时 PN 结呈现的电阻很低。正向电流包括空穴电流和电子电流两部分。空穴和电子虽然带有不同极性的电荷,但由于它们的运动方向相反,所以电流方向一致。外电源不断地向半导体提供电荷,使电流得以维持。

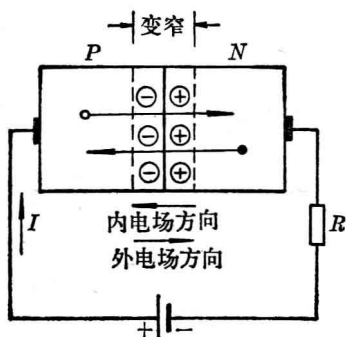


图 8-11 PN 结加正向电压

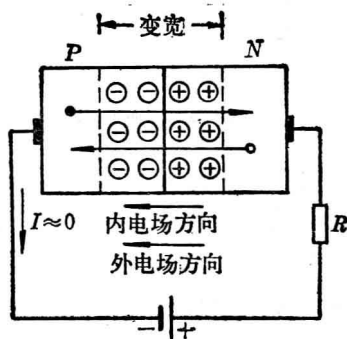


图 8-12 PN 结加反向电压

若给 PN 结加反向电压,即外电源的正端接 N 区,负端接 P 区(图 8-12),则外电场与内电场方向一致,也破坏了扩散与漂移运动的平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强,使多数载流子的扩散运动难于进行。但另一方面,内电场的增强也加强了少数载

流子的漂移运动, 在外电场的作用下, N 区中的空穴越过 PN 结进入 P 区, P 区中的自由电子越过 PN 结进入 N 区, 在电路中形成了反向电流(由 N 区流向 P 区的电流)。由于少数载流子数量很少, 因此反向电流不大, 即 PN 结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子是由于价电子获得热能(热激发)挣脱共价键的束缚而产生的, 环境温度愈高, 少数载流子的数量愈多。所以, 温度对反向电流的影响很大。这就是半导体器件的温度特性很差的根本原因。

由以上分析可知, PN 结具有单向导电性。即在 PN 结上加正向电压时, PN 结电阻很低, 正向电流甚大(PN 结处于导通状态); 加反向电压时, PN 结电阻很高, 反向电流很小(PN 结处于截止状态)。

8-3. 半导体二极管

一、基本结构

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳, 就成为半导体二极管。按结构分, 二极管有点接触型和面接触型等多种。点接触型二极管(一般为锗管)如图 8-13a 所示。它的 PN 结结面积很小(结电容小^①), 因此不能通过较大电流。但其高频性能好。故一般适用

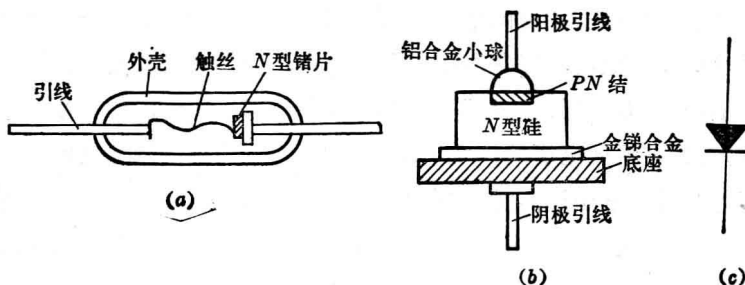


图 8-13 半导体二极管:

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 表示符号

① PN 结具有电容效应。