

高等学校试用教材

电 工 学

中 册

哈尔滨工业大学电工学教研室编
秦 曾 煌 主编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校试用教材

电 工 学

中 册

哈尔滨工业大学电工学教研室编

秦 曾 煌 主 编

人 民 教 育 出 版 社

本书是按照1977年12月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上讨论和修订的机械、动力类《电工学教材编写大纲》(150学时)编写的,可作为该类专业电工学课程的试用教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书分三册出版。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。

参加本书中册编写的有吴项、魏富珍、秦曾煌、柳焯、郭文安、问延臻同志,由秦曾煌同志担任主编。

高等学校试用教材

电 工 学

中 册

哈尔滨工业大学电工学教研室编

秦 曾 煌 主 编

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

人 民 教 育 出 版 社 印 刷 厂 印 装

*

开本 787×1092 1/32 印张 12.5 字数 302,000

1979年3月第1版 1979年8月第1次印刷

印数 00,001—155,000

书号 15012·083 定价 1.05 元

目 录

(带“*”的章节为参考内容)

第二部分 电子技术

第八章	半导体的基本知识	1
8-1.	半导体的导电方式.....	2
8-2.	PN结及其单向导电性.....	5
8-3.	晶体二极管及其应用.....	9
8-4.	稳压管.....	13
8-5.	晶体管的构造与放大原理.....	15
8-6.	晶体管的特性曲线.....	20
8-7.	晶体管的主要参数.....	24
	习题.....	29
第九章	晶体管交流放大器	32
9-1.	交流放大器的图解法.....	32
9-2.	交流负载线.....	42
9-3.	放大器的偏置电路与工作点的稳定.....	44
9-4.	单管放大器的等效电路.....	50
9-5.	阻容耦合放大器.....	58
9-6.	放大器中的负反馈.....	66
9-7.	射极输出器.....	76
9-8.	变压器耦合单管功率放大器.....	80
9-9.	推挽功率放大器.....	83
*9-10.	无变压器功率放大器.....	89
9-11.	集成电路.....	96
	习题.....	100
第十章	晶体管直流放大器	105
10-1.	概述.....	105

10-2.	直流放大器的直接耦合方式	107
10-3.	直流放大器中的零点漂移	110
10-4.	差动放大电路的工作情况	112
10-5.	提高差动放大电路性能的改进电路	121
10-6.	差动放大电路的输入和输出方式	124
10-7.	集成运算放大器	129
10-8.	运算放大器的输入方式	137
10-9.	运算放大器的基本应用电路	144
	习题	151
第十一章	场效应管放大器	157
11-1.	结型场效应管	157
11-2.	绝缘栅场效应管	163
11-3.	场效应管放大电路	168
	习题	175
第十二章	晶体管正弦波振荡器	177
12-1.	自激振荡	177
12-2.	LC 振荡器	180
*12-3.	半导体接近开关	184
12-4.	RC 振荡器	187
	习题	191
第十三章	逻辑门电路	193
13-1.	二极管门电路	195
13-2.	晶体管“非”门电路	201
13-3.	“与非”门电路	205
13-4.	晶体管-晶体管逻辑(TTL)“与非”门电路	206
*13-5.	TTL门电路的扩展器与驱动器	210
13-6.	TTL 门电路的参数	212
13-7.	高阈值逻辑(HTL)“与非”门电路	215
13-8.	NMOS 门电路	216
13-9.	CMOS 门电路	220
*13-10.	逻辑门电路的组合	222
	习题	229

第十四章 触发器与逻辑部件	231
14-1. 基本双稳态触发器	231
14-2. <i>R-S</i> 触发器	237
14-3. 维持-阻塞触发器	240
14-4. <i>D</i> 触发器	243
14-5. <i>J-K</i> 触发器	245
14-6. 具有存储导引电路的 <i>J-K</i> 集成触发器	246
14-7. 单稳态触发器	251
14-8. 无稳态触发器	255
14-9. 射极耦合双稳态触发器	259
14-10. 寄存器	262
14-11. 计数器	265
14-12. 译码器与数码显示	270
*14-13. MOS 触发器与逻辑部件	273
习题	278
第十五章 整流电路与直流稳压电源	281
15-1. 单相半波整流电路	282
15-2. 单相全波与桥式整流电路	284
15-3. 三相桥式整流电路	289
15-4. 滤波电路	293
15-5. 稳压管稳压电路	298
15-6. 串联式晶体管稳压电路	301
习题	305
第十六章 可控硅元件及其应用	307
16-1. 可控硅元件的结构与工作原理	307
16-2. 可控硅元件的伏安特性与控制极特性	310
16-3. 可控硅元件的主要参数	314
16-4. 具有电阻性负载的单相半波可控整流电路	316
16-5. 电感性负载与续流二极管	318
16-6. 单相半控桥式整流电路	321
16-7. 可控硅元件的保护	326

16-8. 单结晶体管触发电路.....	329
*16-9. 晶体管触发电路.....	337
*16-10. 可控硅交流调压.....	339
*16-11. 可控硅开关.....	342
习题.....	344
*第十七章 电子管	346
17-1. 电子二极管.....	348
17-2. 电子三极管.....	349
17-3. 三极管放大电路.....	355
17-4. 多极管.....	361
附录	
附录一 半导体器件型号命名方法.....	365
附录二 常用半导体器件的参数.....	367
附录三 集成电路型号命名.....	374
附录四 TTL“与非”门电路的参数.....	375
附录五 双极型晶体管、场效应管及电子管中电压和电流的符号.....	376
附录六 分贝表.....	376
附录七 布尔代数运算法则.....	377
习题答案	380
中英名词对照	385

第二部分 电子技术

第八章 半导体的基本知识

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。

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。

半导体器件之所以得到广泛应用,其原因不在于它的导电能力介乎导体与绝缘体之间,而在于它的导电能力在不同条件下有很大的差别。这是半导体区别于其它物质的特殊本性。例如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 21.4×10^8 欧·毫米²/米减小到4,000 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,如晶体二极管、三极管、场效应管及可控硅等。

本章首先讨论半导体的导电方式和PN结的基本原理,然后

介绍晶体二极管和三极管的工作原理及其特性。

8-1. 半导体的导电方式

各种元素的原子都由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成,电子分层围绕原子核旋转,最外层的称为价电子,价电子数就是元素的价数。在金属导体中,由于原子的价电子受原子核的束缚力很小,大量电子很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子,因此金属的导电能力很强。而在绝缘体中,由于价电子受到原子核很大的束缚力,自由电子数量很少,可以忽略不计,因此绝缘体基本上是不导电的。纯净半导体中的自由电子数量介乎导体与绝缘体之间。

半导体的导电性能不仅决定于它的原子结构,而且与原子间的结合方式有关。图 8-1 是锗和硅的原子结构示意图,它们各有

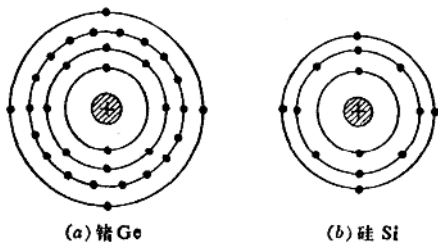


图 8-1 锗和硅的原子结构

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。

在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

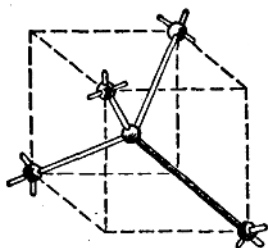


图 8-2 晶体中原子的排列方式

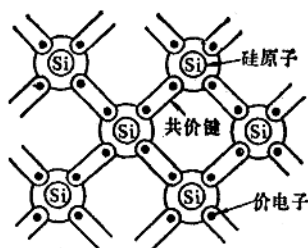


图 8-3 硅单晶中的共价键结构

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脱离原子核的束缚，成为自由电子。温度愈高，晶体中产生的自由电子便愈多。

在电子脱离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。当电子脱离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

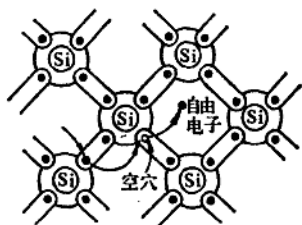


图 8-4 空穴和自由电子的形成

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。

有空穴的原子既然带正电，它就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。如此继续下去，就好象带正电的空穴在运动。

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所形成的电子电流，一是仍被原子核束缚的价电子递补空穴所形成的空穴电流。因此，空穴电流也是由于电子的运动而形成的，但也可以认为它是带正电的空穴向相反方向运动所形成的电流。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。

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相对平衡，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。所以，温度对半导体器件性能的影响很大。

纯净的半导体（即本征半导体）虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量有限，导电能力仍很低。为此，采用了在半导体中有控制地掺入杂质的方法来提高其导电能力。

一种是在硅或锗材料的单晶体中掺入磷（或其它五价元素）。磷原子的最外层有五个价电子（图 8-5）。由于掺入硅单晶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，只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子参加共价键结构只需四个

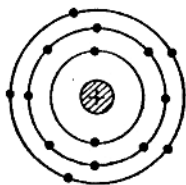


图 8-5 磷原子的结构

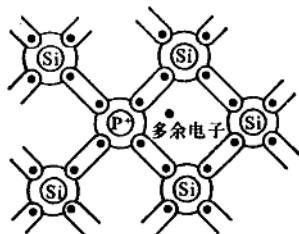


图 8-6 硅晶体中掺磷出现自由电子

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，每立方厘米硅单晶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，其自由电子数目可达 10^{15} 个以上。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。

另一种是在硅或锗晶体中掺入硼(或其它三价元素)。每个硼原子只有三个价电子(图 8-7)，故在构成共价键结构时，将因缺少一个电子而形成空穴(图 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。

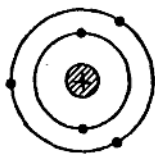


图 8-7 硼原子的结构

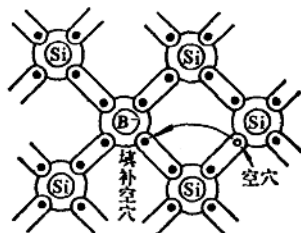


图 8-8 硅晶体中掺硼出现空穴

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。

8-2. PN 结及其单向导电性

P 型或N型半导体的导电能力虽然很强，但并不能直接制造

① 磷原子失去一个电子而带正电。

② 硼原子得到一个电子而带负电。

半导体器件。若设法使一块半导体一边为N型, 另一边为P型, 则在它们的交界处就会形成PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础。

在一块完整的晶体中, 采取一定的工艺措施, 在两个不同的区域掺入不同的杂质, 以分别形成P区和N区。图8-9是P型半导

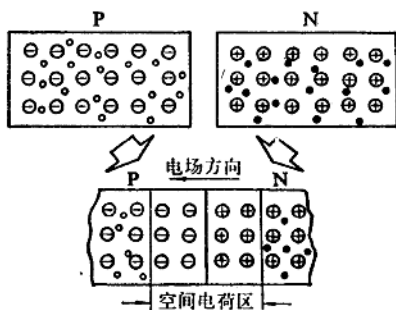


图 8-9 空间电荷区的形成

体和N型半导体的结构示意图。图中 \ominus 代表得到了一个电子的三价杂质原子, 带负电; \oplus 代表失去了一个电子的五价杂质原子, 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), 因此空穴要由P区向N区扩散。首先是交界面附近的空穴移到N区, 在交界面附近的P区留下一些带负电的三价原子, 形成负电荷区。同样, N区的自由电子将向P区扩散, 在交界面附近的N区留下带正电的五价原子, 形成正电荷区。这样, 在P型半导体和N型半导体交界面的两侧就出现了一个空间电荷区, 这个空间电荷区就是PN结。PN结所产生的电场称为内电场, 其方向由N区指向P区, 如图8-9所示。

由于正电荷在电场内的受力方向与电场方向一致, 故由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,故空间电荷区又叫阻挡层。但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,即P区的自由电子可移入N区,N区的空穴可移入P区。在内电场的作用下,少数载流子的这种运动称为漂移运动。内电场对载流子的作用如图8-10所示。

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,空间电荷区逐渐扩大,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。

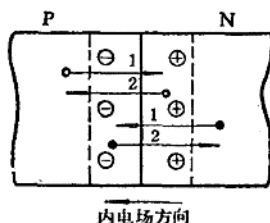


图 8-10 扩散运动与漂移运动达到平衡:

- 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

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。

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。

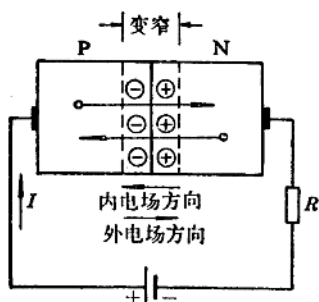


图 8-11 PN 结加正向电压

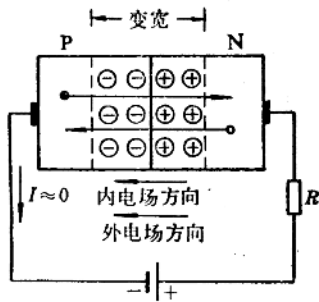


图 8-12 PN 结加反向电压

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，使得空间电荷量增加，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热运动使价电子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，

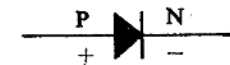


图 8-13 PN 结的表示符号

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)。图 8-13 是 PN 结的表示符号。

8-3. 晶体二极管及其应用

将 PN 结加上相应的电极引线及管壳封装, 就成为晶体二极管。按结构分, 二极管有点接触型和面接触型两种 (图 8-14)。点接触型二极管的 PN 结面积很小, 因此不能通过较大电流, 但其高频性能好, 故一般适用于高频、小功率的范围。面接触型二极管的 PN 结面积大, 做成平面形状, 故能通过较大电流 (可达上千安培), 但其工作频率较低, 一般用作整流。

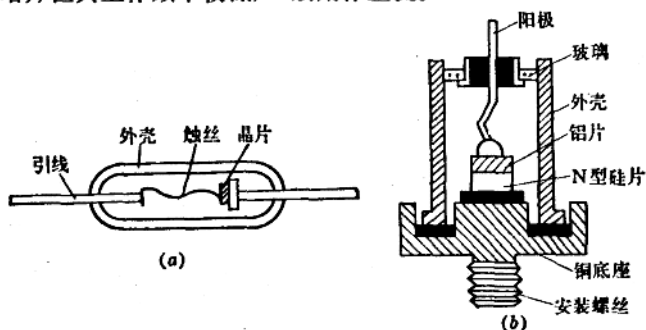


图 8-14 晶体二极管的结构:
(a) 点接触型; (b) 面接触型

二极管既然是一个 PN 结, 它当然具有单向导电的特性, 其伏安特性曲线如图 8-15 所示。由图可见, 当外加正向电压很低时, 由于外电场还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动所形成的阻力, 故正向电流很小。当正向电压超过一定数值^①后, 内电场被大大削弱, 电流增长很快。正向电流愈大, PN 结发热愈严重,

① 这个数值通常称为二极管的死区电压, 其大小与材料及环境温度有关。

故正向电流不能无限制增长。

在二极管上加反向电压时,由于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流。反向电流有两个特点,一是它随温度的上升增长很快,一是在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本

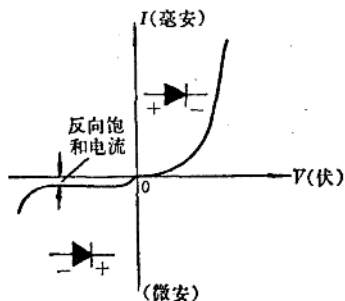


图 8-15 二极管的伏安特性曲线

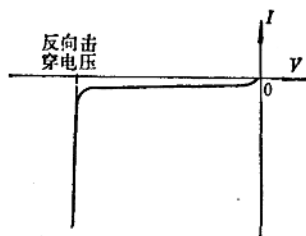


图 8-16 二极管反向击穿

恒定,而与反向电压的高低无关,故通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压过高时,反向电流将突然增大(图 8-16),二极管失去单向导电性,这种现象称为击穿。二极管被击穿后,一般不能恢复原来的性能,便失效了。发生击穿的原因是外加的强电场强制地把原子的外层价电子拉出来,使载流子数目急剧上升。而处于强电场中的载流子又因获得强电场所供给的能量,而将其他价电子撞击出来,如此形成连锁反应,反向电流愈来愈大,最后使得二极管反向击穿。产生击穿时加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压 V_{BR} 。

二极管的主要参数有下面几个:

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长时间使用时,允许流过二极管的正向平均电流^①。点接触型二极管(一般为锗管)的最大整流电流

^① 若通过二极管的是周期性脉动电流,则电流峰值可超过最大整流电流值;但一周期中的平均值不能超过最大整流电流值。