

高等学校教材

# 电 工 学

(第 二 版)

下 册

## 电子技术和自动控制

大连工学院电工学教研室 编

蒋德川 主编

版社

# 目 录

## 第三篇 电子技术

|                        |    |
|------------------------|----|
| 引言 .....               | 1  |
| 第十四章 半导体二极管和整流电路 ..... | 3  |
| 14-1 半导体基础知识 .....     | 3  |
| (一)本征半导体和杂质半导体 .....   | 3  |
| (二)PN 结 .....          | 7  |
| 14-2 半导体二极管 .....      | 9  |
| (一)构造 .....            | 9  |
| (二)伏安特性 .....          | 10 |
| (三)主要参数 .....          | 12 |
| 14-3 单相整流电路 .....      | 13 |
| (一)单相半波整流电路 .....      | 13 |
| (二)单相桥式整流电路 .....      | 17 |
| 14-4 滤波器 .....         | 20 |
| (一)电容滤波器 .....         | 21 |
| (二)电感滤波器 .....         | 26 |
| (三)复式滤波器 .....         | 28 |
| 14-5 硅稳压管和简单稳压电路 ..... | 29 |
| (一)硅稳压管 .....          | 30 |
| (二)硅稳压管稳压电路 .....      | 31 |
| *14-6 三相整流电路 .....     | 36 |
| (一)三相半波整流电路 .....      | 36 |
| (二)三相桥式整流电路 .....      | 38 |
| 练习题 .....              | 40 |
| 第十五章 晶体管和交流放大电路 .....  | 44 |

---

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 15-1 晶体管            | 44  |
| (一)基本结构             | 44  |
| (二)放大作用             | 45  |
| (三)特性曲线             | 48  |
| (四)主要参数             | 51  |
| 15-2 晶体管单管低频电压放大器   | 54  |
| (一)电路的组成            | 54  |
| (二)工作情况的分析          | 56  |
| 15-3 共发射极放大器的小信号模型  | 67  |
| 15-4 放大器静态工作点的稳定    | 77  |
| 15-5 交流放大器的频率响应     | 82  |
| 15-6 多级阻容耦合放大器      | 85  |
| (一)电压放大倍数           | 86  |
| (二)通频带              | 89  |
| 15-7 负反馈放大器         | 90  |
| (一)反馈的基本概念          | 90  |
| (二)负反馈对放大器性能的影响     | 93  |
| (三)反馈的判别            | 98  |
| (四)负反馈放大器的特例——射极输出器 | 100 |
| 15-8 功率放大器          | 105 |
| (一)互补对称功率放大器        | 110 |
| (二)推挽功率放大器          | 117 |
| 15-9 交流放大电路实例       | 120 |
| 练习题                 | 124 |
| 第十六章 直耦放大电路和运算放大电路  | 131 |
| 16-1 直耦放大器          | 131 |
| (一)耦合方式             | 131 |
| (二)零点漂移             | 136 |
| 16-2 差动放大器          | 137 |
| (一)工作原理             | 137 |
| (二)典型电路             | 140 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| (三)其它形式的差动电路 .....      | 144 |
| 16-3 直耦放大电路实例 .....     | 145 |
| 16-4 运算放大器 .....        | 150 |
| (一)基本组成 .....           | 150 |
| (二)集成运算放大器简介 .....      | 152 |
| (三)运算放大器的主要参数 .....     | 153 |
| 16-5 运算放大器的应用 .....     | 155 |
| (一)数学运算 .....           | 155 |
| (二)低通滤波 .....           | 164 |
| (三)电压比较 .....           | 165 |
| (四)波形发生 .....           | 166 |
| 练习题 .....               | 169 |
| 第十七章 正弦波振荡电路 .....      | 175 |
| 17-1 正弦波振荡器的基本原理 .....  | 175 |
| 17-2 $LC$ 正弦波振荡器 .....  | 180 |
| (一)并联谐振回路的选频作用 .....    | 180 |
| (二)基本电路 .....           | 181 |
| (三)应用举例——接近开关 .....     | 185 |
| 17-3 $RC$ 正弦波振荡器 .....  | 187 |
| (一) $RC$ 网络的频率特性 .....  | 187 |
| (二)典型电路 .....           | 189 |
| 练习题 .....               | 190 |
| 第十八章 场效应管及其放大电路 .....   | 193 |
| 18-1 场效应管 .....         | 193 |
| (一)结型场效应管 .....         | 193 |
| (二)金属-氧化物-半导体场效应管 ..... | 198 |
| (三)场效应管的主要参数 .....      | 202 |
| 18-2 场效应管放大器 .....      | 204 |
| (一)电路的组成 .....          | 204 |
| (二)工作情况的分析 .....        | 205 |
| (三)小信号模型 .....          | 208 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 练习题 .....                  | 212        |
| <b>第十九章 门电路和触发器 .....</b>  | <b>214</b> |
| 19-1 脉冲的波形及其参数 .....       | 214        |
| 19-2 基本的半导体开关电路 .....      | 215        |
| (一)二极管开关电路 .....           | 216        |
| (二)晶体管开关电路 .....           | 217        |
| (三)场效应管开关电路 .....          | 219        |
| 19-3 限幅器和箝位器 .....         | 220        |
| (一)限幅器 .....               | 220        |
| (二)箝位器 .....               | 221        |
| 19-4 门电路 .....             | 223        |
| (一)基本概念 .....              | 223        |
| (二)与门电路 .....              | 224        |
| (三)或门电路 .....              | 226        |
| (四)非门电路 .....              | 227        |
| (五)复合门电路 .....             | 228        |
| 19-5 与非门集成电路 .....         | 230        |
| (一)晶体管-晶体管与非门集成电路 .....    | 230        |
| (二)MOS 场效应管与非门集成电路 .....   | 234        |
| (三)与非门集成电路的主要参数 .....      | 235        |
| *19-6 环形多谐振荡器 .....        | 237        |
| 19-7 单稳态触发器 .....          | 241        |
| 19-8 双稳态触发器 .....          | 245        |
| (一) $R$ - $S$ 触发器 .....    | 245        |
| (二)主-从触发器 .....            | 248        |
| (三) $J$ - $K$ 触发器 .....    | 250        |
| (四) $D$ 触发器和 $T$ 触发器 ..... | 252        |
| *19-9 触发器应用举例——脉冲分配器 ..... | 254        |
| 练习题 .....                  | 256        |
| <b>第二十章 数字电路 .....</b>     | <b>260</b> |
| 20-1 数字电路中数的表示法 .....      | 260        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| (一)二进制 .....               | 261 |
| (二)二十进制编码 .....            | 264 |
| 20-2 逻辑代数 .....            | 264 |
| (一)逻辑代数的基本运算法则 .....       | 265 |
| (二)逻辑代数的应用 .....           | 268 |
| 20-3 寄存器 .....             | 270 |
| (一)并行输入并行输出寄存器 .....       | 270 |
| (二)移位寄存器 .....             | 271 |
| 20-4 计数器 .....             | 272 |
| (一)二进制计数器 .....            | 272 |
| (二)二十进制计数器 .....           | 276 |
| 20-5 译码器 .....             | 280 |
| 20-6 数码显示 .....            | 282 |
| *20-7 数字信号与模拟信号的相互转换 ..... | 286 |
| (一)数/模转换器 .....            | 286 |
| (二)模/数转换器 .....            | 289 |
| 20-8 应用举例——转速量测系统 .....    | 293 |
| 练习题 .....                  | 294 |
| 第二十一章 晶闸管和可控整流电路 .....     | 297 |
| 21-1 晶闸管 .....             | 297 |
| (一)基本结构 .....              | 297 |
| (二)工作原理 .....              | 298 |
| (三)阳极伏安特性 .....            | 300 |
| (四)主要参数 .....              | 301 |
| 21-2 单相可控整流电路 .....        | 301 |
| (一)单相半波可控整流电路 .....        | 302 |
| (二)单相桥式可控整流电路 .....        | 307 |
| 21-3 晶闸管的触发电路 .....        | 311 |
| (一)单结晶体管触发电路 .....         | 312 |
| *(二)晶体管触发电路 .....          | 317 |
| *21-4 三相可控整流电路 .....       | 320 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| (一)三相半波可控整流电路 .....             | 320 |
| (二)三相桥式半控整流电路 .....             | 324 |
| 21-5 晶闸管的保护 .....               | 328 |
| (一)晶闸管的过电流保护 .....              | 328 |
| (二)晶闸管的过电压保护 .....              | 329 |
| 练习题 .....                       | 330 |
| <br><b>第四篇 自动控制</b>             |     |
| 引言 .....                        | 332 |
| 第二十二章 无触点继电器控制系统 .....          | 334 |
| 22-1 无触点控制电器 .....              | 334 |
| (一)无触点开关 .....                  | 334 |
| (二)逻辑开关 .....                   | 336 |
| 22-2 无触点继电器控制举例 .....           | 337 |
| 22-3 无触点继电器控制与有触点继电器控制的比较 ..... | 344 |
| 练习题 .....                       | 345 |
| 第二十三章 闭环控制系统 .....              | 346 |
| 23-1 闭环控制系统的基本概念 .....          | 346 |
| 23-2 变换器 .....                  | 350 |
| (一)有源变换器 .....                  | 350 |
| (二)无源变换器 .....                  | 353 |
| 23-3 直流他励电动机的闭环调速系统 .....       | 355 |
| (一)带转速负反馈的调速系统 .....            | 355 |
| (二)电动势负反馈 .....                 | 358 |
| (三)调速系统的微分反馈 .....              | 359 |
| 23-4 位置随动系统 .....               | 360 |
| 练习题 .....                       | 364 |
| 附录 .....                        | 366 |
| F-3 国产半导体器件型号命名法 .....          | 366 |
| F-4 几种常用半导体器件的参数表 .....         | 367 |
| 索引(中英名词对照) .....                | 374 |

## 第三篇 电子技术

### 引言

利用和控制电子在真空、稀薄气体或固体中的运动或能量状态的改变所引起的各种作用而制成的器件统称为电子器件。电子技术是研究电子器件应用的科学。它是电工学中一个非常重要的组成部分,是在十九世纪末叶无线电发明之后才发展起来的。进入二十世纪,由于各种真空管的陆续研制成功,电子技术不仅引起了通讯技术的根本变革,而且逐步推广到国民经济的各个部门,进行物理量的量测,数据的运算与处理,能量的转换和控制,从而推动了测量技术、计算技术以及自动控制技术的迅速发展。

电子技术之所以能够在各个科学领域中占有十分重要的地位,是由于电子器件具有反应迅速、灵敏度高以及使用轻便等等优点的缘故。例如高速的电子计算机,每秒能进行上亿次的运算;精确的电子温度调节器,可以将温度的变化维持在千分之一度的范围以内。

到了二十世纪四十年代后期,人们又研制出了一种新型的电子器件——晶体管,它比真空管的体积更小,重量更轻,功耗更微,寿命更长,因而在许多领域内已经取代了各种真空管。晶体管的出现,是电子技术发展的一个重要的里程碑。人们往往把真空管称为第一代电子器件,而把晶体管称为第二代电子器件。

随着电子计算机的广泛应用,宇宙航行的迅速发展,对电子线路的微型化和可靠性提出了越来越高的要求,于是进一步又研制



成了将各种半导体元件所组成的电路集合在一小块晶片上的集成电路,它被称为第三代电子器件。

科学总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。今天,电子技术又从电路的集成朝着系统的集成迈进,这就是称为第四代电子器件的大规模集成电路。随着大规模集成电路的出现,使得电子计算机微型化的程度愈来愈高,应用范围愈来愈广,在科学技术上形成了新的信息时代。

作为电工学课程的一个部分,我们将要讨论的是常用的半导体电路的基本原理及其在工业上的应用。全部内容都将涉及“管”和“路”两个方面:“管”就是半导体二极管、稳压管、晶体管、场效应管和晶闸管等;“路”就是由半导体管和电阻、电容、电感等元件所组成的整流、滤波、稳压、放大、振荡以及脉冲数字电路等。在学习时,对于“管”的问题,可着重研究它们的特性和使用;对于“路”的问题,必须从物理概念出发来了解一些典型电路的功能和各个元件所起的作用,并且掌握看懂电路图的方法。

## 第十四章 半导体二极管和整流电路

本章首先介绍有关半导体的基础知识，接着讨论最简单的半导体器件——二极管，然后着重阐述利用二极管的单向导电性而将交流电转变成直流电的整流问题。目前，由发电厂所提供的都是交流电，而有些电气设备(例如各种电子设备、直流电动机和电磁工作台等)或生产过程(例如电解和电镀)却必须使用直流电才能正常工作。整流就是为了解决供电与用电之间所存在的这种矛盾。

### 14-1 半导体基础知识

半导体的导电性能介于导体与绝缘体之间。目前，应用最广的半导体是硅和锗。在这里，我们以硅为例来说明半导体的导电机理。

#### (一)本征半导体和杂质半导体

物质的导电性能，取决于物质内部原子本身的结构以及原子与原子的结合方式。硅是四价元素，它的原子的最外层有四个价电子。将硅提炼成单晶体时，原子排列得非常整齐，彼此之间的距离都是相等的。每个原子最外层的四个价电子，既受自身原子核的约束，又跟周围的四个原子发生联系，每两个相邻的原子之间都共有一对价电子。这样的原子结合方式叫做共价键结构。纯净而原子排列非常整齐的半导体称为本征半导体。图 14-1 为单晶硅原子结构的示意图。

温度接近绝对零度时，共价键中的价电子被束缚得很紧，半导

体也就和绝缘体一样,不能导电。在室温(300 K)的情况下,共价键

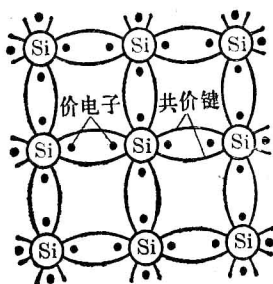


图 14-1 单晶硅的原子结构示意图

中的价电子受到热的激励(图 14-2),有少量价电子能够挣脱共价键的束缚而成为自由电子,同时在原来的位置上留下一个空位,我们把它叫做空穴。自由电子存在的地区呈现负电性,空穴所在的地区呈现正电性。在本征半导体中,有了一个自由电子,就必然有一个空穴,两者的数量是相等的。自由电子和空穴不断地产生,也不断地复合。

当有外电场的作用时,本征半导体中的自由电子将沿着和外电场相反的方向运动,同时在空穴邻近的另一个共价键中的价电子由于热运动(还未具有足以成为自由电子的能量)也受外电场的影响而来填充了这个空穴,于是在另一共价键中留下一个新的空穴。这种情况犹如空穴移动到一个新位置上。由此可见,本征半导体中的空穴,在外电场的作用下也在依次运动,它的方向则和自由电子的运动方向相反。因此,我们可以把空穴看作是和一个带有正电荷的粒子一样。半导体之所以能够导电,就是因为内部具有这两种载流子——自由电子和空穴的缘故。在本征半导体中,自由电子和空穴的数量很少,因而它的导电能力远远不如导体。就本征硅来说,它在室温下的电导率为  $4.4 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ , 比铜的电导率  $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$  小得很多很多。



图 14-2 热激励产生的电子空穴对

但是,半导体的使用价值不因它的电导率低而受影响,它的可贵之处在于具备这样两个性质:第一,半导体的载流子浓度,也就是电导率,随着温度的升高而按指数规律增长(常温下每增加 $1^{\circ}\text{C}$ 约增加5%)。热敏电阻就是利用这一性质制成的,它在仪器制造和控制方面应用很广。第二,在本征半导体中掺入少量有用的杂质,就可以使电导率显著增大。这种掺有杂质的半导体就叫杂质半导体。由于所掺的杂质不同,杂质半导体分为电子型半导体和空穴型半导体两大类。现在还是以硅作为例子来加以说明。

如果我们在纯硅中加入少量的五价元素磷(也可以是砷或锑),当一个五价的磷原子取代一个四价的硅原子时(图14-3),它的五个价电子中只有四个用来构成共价键,剩下的这个电子,只要给以少量的热能,就成了对导电极其有用的自由电子。由此可见,掺入一个五价元素的原子,就能提供一个自由电子,因而在单晶硅中掺入杂质之后,自由电子的数目比没有掺杂的要大得多。这些新出现的自由电子,数量远远超过原来未掺入杂质时自由电子与空穴的总和。因此,在全部载流子中,占压倒多数的是自由电子,而空穴的数量则很少,导电作用主要由自由电子决定,所以称自由电子为多数载流子,而空穴则是少数载流子。这种类型的杂质半导体就叫电子型半导体,简称N型半导体。在N型半导体中,由

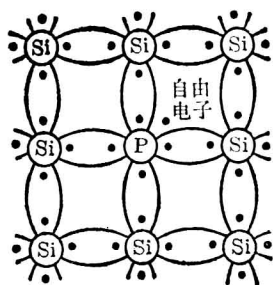


图14-3 N型半导体的晶体结构

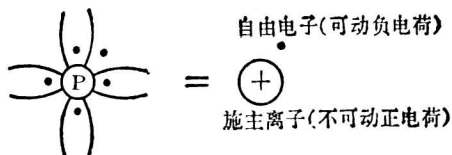


图14-4 杂质半导体中的施主原子

于五价元素磷提供了自由电子,因而把磷原子叫作施主原子。这时施主原子是不可动的正电荷(施主离子)与可动的负电荷(自由电子)的结合体(图 14-4)。

另外,如果在纯硅中掺入少量的三价元素硼(也可以是铝、镓或铟),当晶体中由一个三价的硼原子取代一个四价的硅原子时(图 13-5),它只有三个价电子可以用来构成共价键,而在剩下的一个未填满的共价键中出现一个空穴。掺一个三价原子,就会出现一个空穴。这些新出现的空穴,数量远远超过未掺杂时原有的自由电子与空穴的总和。因此,全部载流子中占压倒多数的是空穴,而自由电子的数量则很少。所以这种掺杂半导体对导电起主要作用的是空穴。空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。这种类型的掺杂半导体称为空穴型半导体,简称 P 型半导体。在 P 型半导体中,由于三价元素硼提供易于接受电子的空穴,因而把硼原子称为受主原子。受主原子的性质可以看作是不可动的负离子与可动的正电荷(空穴)的结合体(图 14-6)。

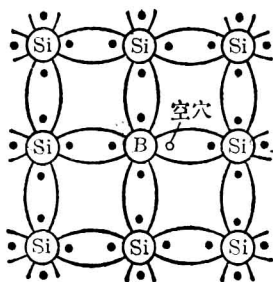


图 14-5 P 型半导体的晶体结构

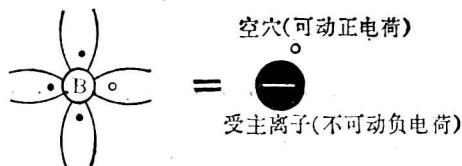


图 14-6 杂质半导体中的受主原子

显然,改变杂质半导体中施主原子或受主原子的浓度,就能改变杂质半导体的电导率。理论计算的结果告诉我们,每一千万个硅原子中替换进一个受主原子,在室温下的电导率为  $38.4\text{ S/m}$ ,比未掺杂时的  $4.4 \times 10^{-4}\text{ S/m}$  增大很多。

## (二)PN 结

单一的杂质半导体,通常只能制成电阻元件来使用。如果经过特殊的工艺加工,将P型半导体和N型半导体紧密地结合在一起,则在两种半导体的交界处就会形成一个PN结。PN结是构成半导体二极管、三极管以及晶闸管等半导体器件的基础,因此讨论它是怎样形成和具有什么特性就显得十分必要了。

我们已经知道,N型半导体中有较多的自由电子,P型半导体中有较多的空穴。当两者结合在一起时,由于它们的载流子存在浓度上的差异,N型半导体中的一部分电子将扩散到P型半导体中去,P型半导体中的一部分空穴也会扩散到N型半导体中来,如图14-7所示。N型半导体失去电子后将形成一个带正电的离子层A,P型半导体失去空穴后将形成带负电的离子层B。

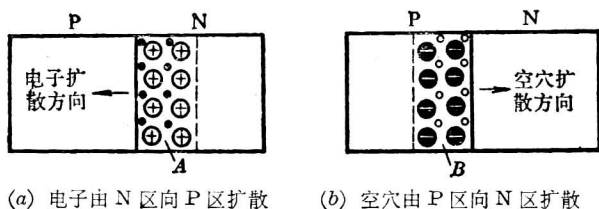


图 14-7 载流子在半导体中的扩散

由于电子和空穴的扩散是同时进行的,所以正离子层A与负离子层B同时产生于N型和P型半导体交界面的两侧,因而在A、B两层之间产生了一个电场。这个电场的方向由N型半导体指向P型半导体(图14-8)。

很明显,由这个电场所产生的电场力将阻止P区的多数载流子(空穴)继续向N区扩散,同样也阻止N区的多数载流子(电子)继续向P区扩散。因此我们把离子层A、B叫做阻挡层,也就是PN结。值得注意的是,PN结的电场力同时

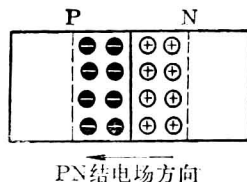


图 14-8 PN 结和它的电场

会使 P 区的少数载流子(电子)向 N 区移动,也使 N 区的少数载流子(空穴)向 P 区移动。为了使这种在电场力作用下产生的载流子运动区别于因浓度差而形成的扩散运动,我们把载流子在电场力作用下的运动叫做漂移运动。由此可见,载流子在 PN 结的扩散运动与漂移运动是同时发生的。在 PN 结形成的过程中,刚开始时,扩散运动处于优势,阻挡层随着扩散运动的进行而加厚,电场力也就越来越大,于是扩散运动逐渐减弱而漂移运动逐渐增强,直到扩散运动的作用与漂移运动的作用相等时,阻挡层的厚度不再增加,达到了动态平衡。这时离子层 A、B 上的正、负电荷量是相等的,有时把这个区间叫做空间电荷区;由于离子层中可以自由移动的载流子都已经扩散完毕,因此这个区间又叫做耗尽区。如果 N 型半导体和 P 型半导体的掺杂浓度相等,则离子层 A 和 B 的厚度也是相等的;如果两者的浓度不等,为了保持离子层 A、B 上的正负电荷量相等,掺杂浓度低的半导体一侧的离子层就要厚一些。换句话说,耗尽区向掺杂较少的半导体中延伸得多一些。

PN 结形成时,由于离子层 A、B 分别带有正电荷和负电荷,因而两者之间存在着电位差,称之为内建电位差,它的大小与掺杂浓度有关。就单晶硅制成的 PN 结来说,一般内建电位差的数值为零点几伏。这个内建电位差不能用来产生外电流,但是它却阻碍 P 区和 N 区中多数载流子继续扩散。

PN 结的两个离子层带有正、负电荷,与极板带电时的电容器的作用相类似。PN 结的这种电容叫作结电容。结电容的数值不大,只有几个皮法。

如图 14-9 所示,若将 PN 结与一个电动势为  $E$  的理想电压源联接起来①, P 型半导体接到电源的正极上, N 型半导体接到电

---

① 在这里,假定电压源的电动势很低,当它加在 PN 结两端时,不足以引起过大的正向电流而使 PN 结损坏。

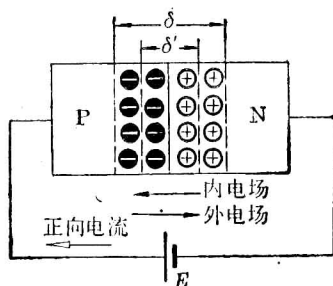


图 14-9 正向偏置的 PN 结

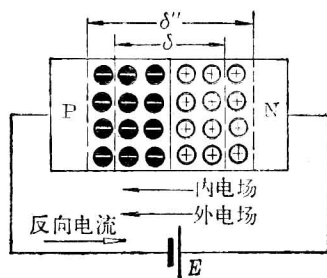


图 14-10 反向偏置的 PN 结

源的负极上,这种联接法叫做 PN 结的正向联接,又叫正向偏置,加在 PN 结两端的电压为正向电压。这时电源  $E$  作用于 PN 结上的外电场与 PN 结本身的内电场方向相反,使阻挡层的厚度由原来的  $\delta$  减小为  $\delta'$ ,PN 结两侧的多数载流子就能持续不断地越过 PN 结而在回路中形成较大的正向电流。此时 PN 结在电路中呈现的电阻称为正向电阻,阻值较小。相反地,如图 14-10 所示,若将 P 型半导体接到电源  $E$  的负极,而将 N 型半导体接到正极,这种接法叫做 PN 结的反向联接,也叫反向偏置,加在 PN 结两端的电压为反向电压。这时外电场的方向与内电场的方向相同,使阻挡层的厚度由原来的  $\delta$  增大为  $\delta''$ ,PN 结两侧的多数载流子不能越过 PN 结,少数载流子则能通过 PN 结在回路中形成非常微小的反向电流,PN 结在电路中呈现极大的反向电阻。

由此可见,PN 结在正向偏置时,有较大的正向电流流动,这种情况叫做导通;反向偏置时,只有极小的反向电流流动(通常可以略去不计),这种情况叫做截止。PN 结所具有的这种特性叫做单向导电性。

## 14-2 半导体二极管

### (一) 构造

半导体二极管实际上就是在 PN 结的两端接上电极引线作为



管心，再加管壳封装而成，常见的几种半导体二极管的外形如图 14-11 所示。

半导体二极管的两个电极分别称为阳极(又称正极,即 P 型半导体的引出线)和阴极(又称负极,即 N 型半导体的引出线)。由于

半导体二极管具有单向导电性,通常用如图 14-12 所示的符号表示,箭头指的是正向电流的方向。

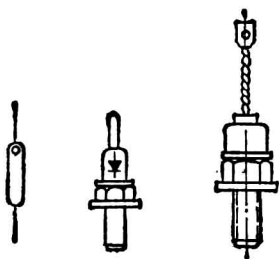


图 14-11 半导体二极管的外形



图 14-12 半导体二极管的符号

按照内部结构的不同,半导体二极管分为点接触式和面接触式两种(图 14-13)。点接触式的二极管, P 型半导体和 N 型半导体的接触面很小,只能通过较小的电流(几十毫安以下),但是由于它的结电容小,因而可以作为高频检波和小电流的整流用。面接触式的接触面大,容许通过较大的电流(几百毫安至上千安),可是结电容较大,不能在高频电路中应用。

根据所使用的半导体材料的不同,目前常用的二极管又分为锗二极管和硅二极管两种。

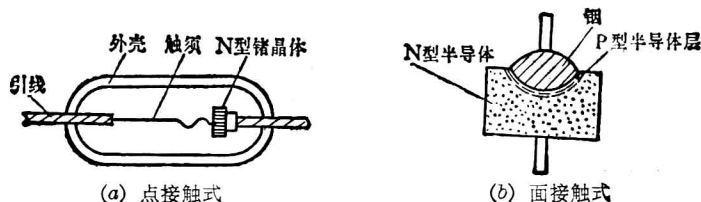


图 14-13 二极管的结构

## (二) 伏安特性

半导体二极管的性能常用伏安特性来表示。所谓伏安特性,