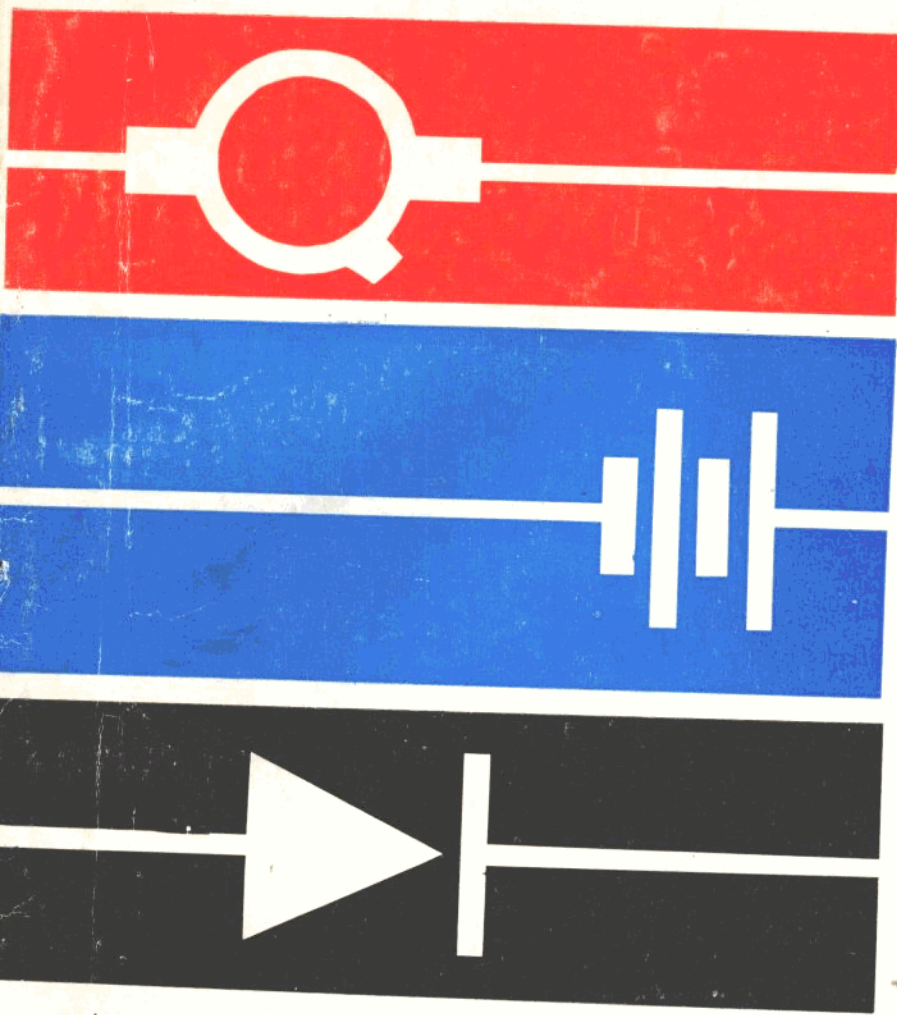


中等专业学校试用教材

# 工业电子学



主  
编  
冯保来

山西  
教育  
出版社

# 前 言

《电工学》、《工业电子学》这两本书是适用于轻工中专工科非电专业的电工课教材。

这套教材是依据国家教委 1987 年颁布的中专非电专业《电工学与工业电子学》教学大纲编写的,总教学时数为 130 学时。由于编入了一些选学内容(小节前标有※号),所以其它教学时数的专业也可参考使用。

电工学与工业电子学是工科非电专业开设的一门公共技术基础课,为了在这门课程中反映近年来电工领域中新技术、新工艺、新材料、新器件的发展和运用,为了适应推行电工图形符号和文字符号新的国家标准的要求,并考虑轻工中专工科非电专业的特点及电工课学时较紧的实际情况,使教师易教、学生易学,由河南省轻工业学校、山西省轻工业学校等九所学校的有关老师通力合作,编写了这套教材。

本教材的主要特点是:

1. 篇幅较小,内容求精。不求内容面面俱到,而力求使学生在有限的学时内学到专业所需的最基本的最重要的电工、电子技术知识。

2. 深度适中,掌握分寸。注意中专层次的特点,不过分追求理论的深度和严谨。以应用为目的,多用概念和原理的叙述,少用数学公式推导。

3. 注重应用,联系实际。立足于培养应用型中等技术人才,在内容的取舍、原理的阐述及例题的选择等方面注意联系生产实际和培养学生应用知识的能力。

此外,教材注意了新技术与新器件的介绍,删除了一些较为陈旧或次要的内容,以使教材重点更加鲜明突出。

书中涉及的图形符号和文字符号,尽可能地采用了新的国家标准。

《工业电子学》由冯保来主编(河南省轻工业学校),副主编为程周(安徽省轻工业学校)、吴秀兰(哈尔滨轻工业学校)、吴旗(江苏省常州轻工业学校)。尹印栓老师(大连市轻工业学校)担任主审。此外,参加编写工作的有:河北省轻工业学校陈崇刚、张世达,河南省轻工业学校杨景荣、张善方、镛广钊,陕西省轻工业学校郭崇智,大连市轻工业学校孙英娥,山西省轻工业学校程立新、张文富,辽宁省轻工业学校李明水,广州市第二轻工业学校甘德。

本教材的编写,得到了各参编学校领导的大力支持和帮助,山西省轻工业学校校长关键同志等对本书的编写和出版给予了具体的指导,我们在此一并表示衷心的感谢。

限于编著者的学识水平,书中错误和缺点在所难免,恳请使用本书的老师和读者提出宝贵意见。

编 者

1992年8月

# 目 录

|                   |      |
|-------------------|------|
| 绪 论               | (1)  |
| 第一章 晶体二极管与三极管     | (4)  |
| 1-1 半导体的基本知识·PN结  | (4)  |
| 1-2 晶体二极管         | (8)  |
| 1-3 晶体三极管         | (10) |
| 1-4 晶体三极管的特性曲线    | (13) |
| 1-5 晶体三极管的主要参数    | (15) |
| 习 题               | (17) |
| 第二章 晶体管放大器        | (19) |
| 2-1 单管电压放大器       | (19) |
| 2-2 放大器的图解分析法     | (24) |
| 2-3 分压式电流负反馈偏置电路  | (30) |
| 2-4 放大器的简化微变等效电路法 | (33) |
| 2-5 多级电压放大器的耦合方式  | (39) |
| 2-6 负反馈在放大器中的作用   | (41) |
| 2-7 射极输出器         | (44) |
| 2-8 功率放大器         | (46) |
| 2-9 直流放大器         | (49) |
| 2-10 集成运算放大器      | (54) |
| 习 题               | (60) |
| 第三章 晶体管整流电路及稳压电源  | (64) |
| 3-1 单相半波整流、桥式整流电路 | (64) |
| 3-2 滤波电路          | (67) |
| 3-3 硅稳压管及其稳压电路    | (73) |
| 3-4 串联型晶体管稳压电源    | (76) |
| 3-5 集成稳压电路        | (79) |
| 习 题               | (80) |
| 第四章 晶闸管及其应用       | (82) |
| 4-1 晶闸管           | (82) |
| 4-2 单相可控整流电路      | (86) |
| 4-3 晶闸管单相交流调压电路   | (92) |
| 4-4 晶闸管触发电路       | (94) |
| 习 题               | (99) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第五章 数字电路基础</b> .....     | (101) |
| 5-1 概述.....                 | (101) |
| 5-2 晶体管开关特性.....            | (103) |
| 5-3 基本逻辑门电路.....            | (106) |
| 5-4 TTL集成与非门.....           | (112) |
| 5-5 集成触发器.....              | (115) |
| 5-6 寄存器.....                | (122) |
| 5-7 计数器.....                | (126) |
| 5-8 译码与显示电路.....            | (130) |
| 习 题.....                    | (134) |
| <b>附录</b> .....             | (141) |
| 附录一 半导体器件的型号命名方法.....       | (141) |
| 附录二 常用二极管的主要参数.....         | (142) |
| 附录三 常用三极管的主要参数.....         | (144) |
| 附录四 晶闸管的主要参数.....           | (146) |
| 附录五 半导体集成电路型号命名方法.....      | (147) |
| 附录六 应用实例 气相色谱仪自动温度控制线路..... | (148) |
| 附录七 常用文字符号一览表.....          | (151) |
| 附录八 常用图形符号一览表.....          | (154) |
| 部分习题参考答案.....               | (157) |
| <b>参考书目</b> .....           | (159) |

# 绪 论

## 一、工业电子学的研究对象

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。电子器件包括电子管与离子管、半导体管(又称晶体管)、集成电路。电子管与离子管现已多被半导体器件所取代,所以本书不再予以讨论。电子电路是由电子器件组成(并以电子器件为主)的电路。按照工作信号的不同,电子电路可分为模拟电路和数字电路两类。

电子技术作为本世纪初诞生的一门新兴技术,在短短几十年中更新换代、迅速发展,已经成为当代先导技术和新生产力的代表。作为当今高新技术的先锋,电子技术的应用遍及通讯、控制、计算机和人们社会经济文化生活的各个方面。在我国的四化建设中,电子技术正起着并将进一步起着不可估量的重要作用。

工业电子学主要研究的是电子技术在工业领域中的应用。随着工业生产各部门日益增长的需要和电子技术的不断发展,工业电子学在现代工业生产中的作用和地位日益重要,其应用也更加广泛而深入。近年来新兴的“机电一体化”技术就是微电子技术及信息处理技术、系统控制技术与传统的机械技术互相结合、渗透和发展的产物。它不仅可用于新型机电产品的设计,而且可用于旧设备的改造,能够创造出数控机床、加工中心、机器人及无人自动化工厂等等。

电子技术之所以被广泛应用于各个工业领域,在于它有以下几个方面的作用:

### 1. 可以实现各种形式电能的相互转换

例如,晶体管整流电路可以将交流电能转变为直流电能;晶闸管可以实现对交流电的可控整流,也可用于逆变将直流电变为交流电。

### 2. 可以很方便地对各种物理量进行准确的检验和测量

工业生产中的许多物理量,如温度、压力、流量、尺寸、转速、溶液的浓度等等,都可以通过传感器变成微弱的电信号。这些电信号经电子电路的放大、变换和处理,便可在仪表上显示出来,从而实现对非电量的电测量。电子电路可以做到很高的灵敏度和很高的放大倍数,其电路设计十分灵活,所以测量范围非常广泛,这是其它类型的仪器仪表所难以比拟的。

### 3. 很容易实现自动控制

电子电路可以构成许多自动控制元件的主体和自动化系统的核心,所以电子技术不仅可用于被动的检测,而且可用于主动的控制。由电子电路做成的无触点开关和继电器在许多场合取代了有触点开关和传统形式的继电器。由集成电路构成的各种程序控制和数字控制系统可以使复杂的生产过程实现自动化。

工业电子学的主要研究对象就是与上述几种作用密切相关的电子器件和基本电子电

路。

## 二、工业电子学课程的任务

工业电子学是工科非电专业的一门公共技术基础课,是电工学的后续课程。它的主要任务是使学生掌握与一般工业生产技术有关的电子技术的基本理论(电子电路的工作原理与分析方法)、基本知识(电子器件、电子电路的性能与应用)和基本技能(电子电路的实验能力、运算能力和读图能力);使学生了解电子技术电能转换、工业物理量的检测和自动控制方面的作用以及应用方法,为有关后续课程的学习及电子技术在本专业的应用打下必要的基础。

## 三、工业电子学课程的特点及其学习方法

工业电子学与电工学一样,是一门理论与实践同等重要的课程,下面结合这门课程的特点介绍一下有关的学习方法。

1. 工业电子学是继电工学之后开设的一门应用技术基础课,电工学的有关理论知识也是分析电子电路的基础,所以在学习工业电子学之前一定要学好电工学。此外,工业电子学本身在电子技术中也属于入门的基础,课程中包括许多电子技术的基本概念和基本原理。比起其它技术学科来,电子技术的理论在其应用实践中具有更强的指导意义。这正是工业电子学课程的理论性强的体现,也因为它作为一门技术基础课,入门并非轻而易举的原因。因此在学习本课程时,必须从一开始就要正确、深刻而牢固地建立起基本概念。切忌似懂非懂、一知半解,否则对于后面内容的学习以及将来的应用实践都是不利的。在基本概念的基础上弄懂基本原理,循序渐进,入门是可以搞好的。入了门,站稳了脚跟,也就可以登堂入室、一步一步地前进了。

2. 工业电子学的实践性除了它可以直接应用于生产实践外,首先表现为它的实践观点。例如在电子电路的分析过程中普遍采用的数值估算,就是从工程实际要求出发、从具体的情况出发,忽略掉一些次要的因素或在数值上影响很小的量值,使计算简单而达到切合工程实际需要的精度。同时,这种主、次因素的区分并不是一成不变的。在某些问题、某些情况下可忽略的问题,在另外一些问题和情况下不一定能忽略,等等。所以在本课程的学习中,应该训练并学会自然地运用这种观点处理问题。

3. 在工业电子学的学习中,实验观点也是极其重要的。工业电子学的理论与实验密切相关,实验可以验证理论,实验中包含着理论,实验可以训练分析解决实际问题的能力。从另一角度看,电子装置的产生一般经过三个过程:①定性分析过程:根据基本原理拟定电路结构;②定量估算过程:确定各元器件的参数值;③安装调试过程:通过实验调试使电路的工作情况符合设计要求。工业电子学课程的内容、性质决定了它的实验一般都包含定性分析与定量分析及安装调试的过程。所以必须强调和重视实验能力(包括分析能力和动手能力)的培养。通过实验,学生应当学会常用的电子仪器的使用方法,学会调试和测量电子电路的基本方法,深化对电子技术理论的理解,领会工业电子学课程的实践意义。

4. 除上述几点外,在工业电子学课程的内容中,还应明确认识以下几个具体问题:

(1)工业电子学中所涉及的量基本上属于“弱电”的性质

与电工学中着重研究“强电”问题不同,电子学中主要讨论的是微弱信号的产生、放大与变换。在“弱电”领域中有着与“强电”不同的特殊问题、特殊观点和特殊的处理方法。

(2)在电子电路中,交流电与直流电常常并存于共同的电路中

分析电子电路时,必须分清静态与动态,必须弄清量的性质,分清交流量与直流量,了解它们之间的关系及各自的通道,并用正确的符号将交流量与直流量表示出来。

(3)电子电路中含有非线性的电子元器件

工业电子学中主要讨论线性范围的问题,所以一方面应了解元器件的非线性可能带来的影响(如失真),另一方面要掌握在一定条件下把非线性问题等效为线性问题的原则和方法。

# 第一章 晶体二极管与三极管

## 1-1 半导体的基本知识·PN结

在以科技振兴中华的时代,国民经济各个领域,无论是在能量转换,还是在自动控制系统以及检验与测量等方面,半导体技术的应用越来越广泛。

半导体器件,如二极管、三极管以及由这些器件构成的电路是电子学基本的研究对象,掌握半导体二极管和三极管的结构及其工作原理,特别是它们的特性和参数,对分析电子线路,掌握电子技术是必须具备的基础。*PN*结又是构成二极管、三极管及其它半导体器件的共同基础。因此,本章首先讨论半导体的基本知识、*PN*结的形成,然后学习二极管和三极管的结构、特性和参数,分析它们的工作原理及应用。

### 一、半导体的特性

半导体由其导电性介于导体和绝缘体之间而得名。常用的半导体材料有硅、锗、硒以及某些金属氧化物和硫化物等。半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,还有许多不同于其它物质的特点。

1. 当外界温度变化或受到光的照射时,半导体的导电能力变化很大。如温度升高,导电能力增强。此外,电场、磁场等作用也都能改变其导电能力。这种对外界条件变化的高度敏感性,使半导体具有多种用途,可以制成热敏电阻,光敏电阻等。

2. 在纯净的半导体中加入微量有用的杂质,其导电能力也会显著增加,利用这一特性能制造出各种不同的半导体器件,如二极管、三极管,场效应管及晶闸管等。

综上所述,半导体是一种受外界条件如热、光,电场、磁场和掺杂等影响而易改变其导电性能的材料。半导体的上述特性,是由其内部特殊的原子结构所决定的。下面通过对半导体原子结构的介绍,来讨论半导体的导电原理。

### 二、本征半导体

本征半导体就是完全纯净、结构完整的半导体晶体,它的纯净度可以达到99.99%以上。常用的半导体材料有硅(Si)和锗(Ge),现以硅的原子结构为例说明半导体的导电原理。硅单晶体的结构如图1-1所示。

硅是四价元素,原子最外层有4个电子。制成单晶体时,其原子的排列就由杂乱无章的状态变为排列非常整齐的状态。此时每个原子最外层的4个电子,不仅受自身原子的束缚,而且还与周围相邻的4个原子发生联系。每两个相邻原子之间都共有一对电子,通过这对电子就把相邻两个原子紧密联系在一起,形成共价键,其结构如图1-1(a)所示。我们常把原子最外层的电子称为价电子,此时,半导体原子周围的价电子也都被束缚在共价键之中。在常温下,本征半导体没有可以移动的电荷,所以在外电场的作用下不能形成电



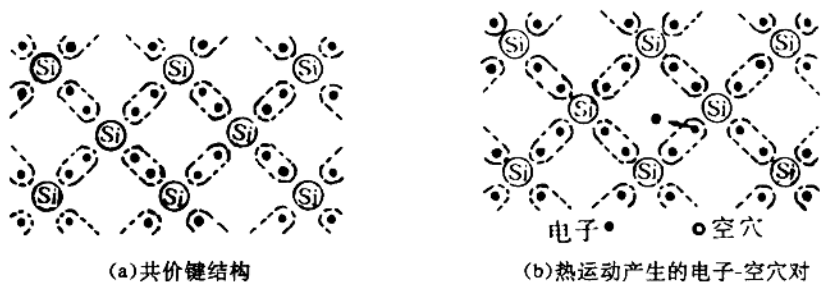


图 1-1 硅单晶体的结构

流。在共价键结构中，原子外层虽都有 8 个电子，处于较稳定状态，但由于共价键中的电子不象绝缘体电子那样被束缚得很牢固，所以当温度升高或受到光照时，本征半导体中有少量的价电子从外界获得足够的能量，便挣脱原子核束缚，离开共价键成为带负电荷的自由电子，这种现象称为本征激励。值得注意的是电子的离开留下了空位，原来的中性原子因失去电子必然带正电荷。可以把这一空位想象为一个带正电荷的粒子，其电量与电子电量相等，这样的空位称为空穴，如图 1-1(b)所示。不难看出空穴和自由电子总是成对出现的，同时空穴会被邻近电子补充，不断产生新的空穴，这个递补过程就是空穴在运动的过程，空穴运动方向与电子运动方向相反。因此可以认为空穴运动就是正电荷的运动。从而得出半导体导电的重要特点是它具有两种载流子即自由电子和空穴。在外电场作用下，自由电子沿着与外电场相反的方向运动，形成电子电流；空穴则由邻近原子共价键中的电子不断填补，沿着电场方向运动，形成空穴电流。必须指出：本征激励的载流子数量是很少的，浓度很低，因此本征半导体的导电能力远不如导体。

**三、N 型半导体和 P 型半导体**

在半导体中掺入微量的有用杂质，可以大大增加自由电子或空穴的数目，从而提高半导体的导电能力。掺杂半导体分 N 型和 P 型两类。

N 型半导体是在四价元素硅(Si)或锗(Ge)的单晶体中，掺入少量的五价元素如磷或砷、锑而形成的。由于五价元素的原子外层有五个电子，当它们与相邻的四个硅原子结合构成四对共有电子时，多余一个电子，它很容易受激励而成为自由电子。如图 1-2(a)所示，因为掺入硅中的每一个杂质原子都可能提供一个自由电子，所以这种半导体的导电能力增强。若在每立方厘米硅中，掺入的磷原子仅为硅原子的  $10^6$  分之一，则每立方厘米掺杂半导体中将含有载流子  $5 \times 10^{22} \times 10^{-6}$ 。它比室温下由本征激励所产生的载流子浓度大  $10^6$  倍。这种自由电子为多数载流子的半导体，称为 N 型半导体，也叫电子型半导体。

P 型半导体是在四价元素硅或锗的单晶体中，掺入微量的三价元素如硼而形成的，三价元素原子的外层只有 3 个电子，当它与相邻的 4 个硅原子形成共价键时，必定缺少 1 个电子，便出现一个空穴，如图 1-2(b)所示。在这种半导体中，空穴的数量远大于自由电子的数量，所以空穴是这种半导体的多数载流子，称此种半导体为 P 型半导体，也叫空穴型半导体。

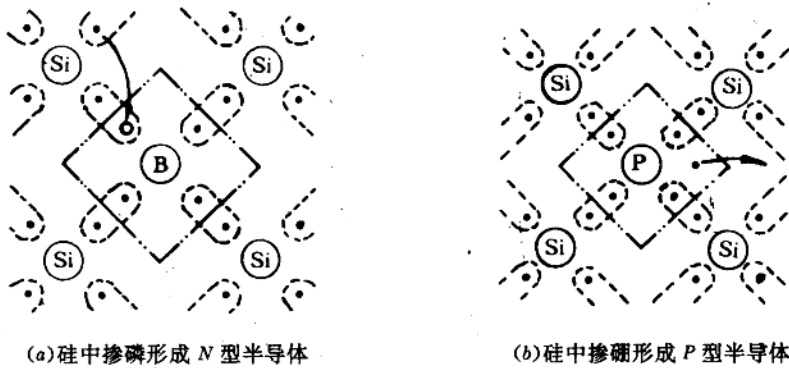


图 1-2 硅单晶体中掺杂后的示意图

在 P 型半导体中,空穴是多数载流子,简称多子,自由电子是少数载流子,简称少子。在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子(多子),空穴是少数载流子(少子),但无论哪一种掺杂半导体在整体上仍然都是中性的。

#### 四、PN 结及其单向导电性

PN 结是制成各种半导体器件的基础,所以掌握 PN 结的形成和特性是十分必要的。

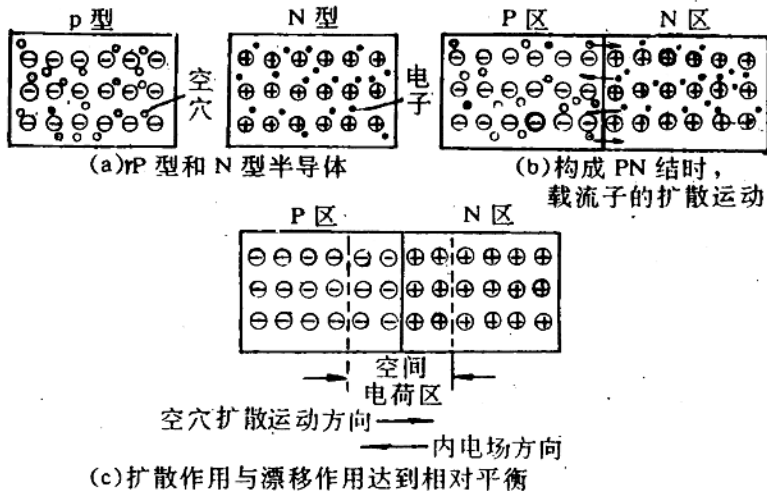


图 1-3 PN 结的形成

用一定的工艺方法,把 P 型半导体和 N 型半导体紧密地结合在一起,由于 P 型半导体的空穴浓度高,自由电子浓度低,而 N 型半导体的自由电子浓度高,空穴浓度低,所以在两种半导体的交界面两侧载流子形成了较大的浓度差别,因而在交界面附近产生了多数载流子的扩散运动,即 P 区的空穴向 N 区扩散,同时 N 区的自由电子也向 P 区扩散,如图 1-3(b) 所示。

在扩散运动进行的同时,交界面两侧的空穴与电子也不断地复合,复合的结果是在交

界面附近的  $P$  区一侧,因失去空穴而出现负电荷区,同样在交界面附近  $N$  区一侧,因复合掉的是自由电子,因而出现正电荷区,这样在交界面两侧就形成了一个不能移动的空间电荷区,其正负电荷间产生了一个内电场。由内电场的作用方向可知,多数载流子的扩散运动要受到阻碍作用,同时这一内电场把  $P$  区的少数载流子——电子拉向  $N$  区,把  $N$  区的少数载流子——空穴拉向  $P$  区,这种在内电场作用下的少数载流子的运动称为漂移运动。扩散与漂移是两种互相对立的运动。随着扩散运动的进行,空间电荷区里不能自由移动电荷增多,空间电荷区逐渐变宽,于是阻碍扩散运动的内电场增强,随之使漂移运动也越来越强,当扩散运动进行到一定程度时,在同一时间内,扩散到空间电荷区的载流子数量和漂移回去的载流子数量相等,两种运动达到了动态平衡,建立起一定宽度的空间电荷区,这个空间电荷区就称为  $PN$  结。 $PN$  结的内电场对扩散起阻碍作用,所以  $PN$  结又称为阻挡层,如图 1-3(c)所示。

$PN$  结的重要特性是单向导电性。如图 1-4(a)所示实验。在电源和灯泡组成的电路中接入一个  $PN$  结(二极管), $PN$  结两端加正向电压时,即  $P$  区接电源正极, $N$  区接电源负极,灯泡发光。在这种情况下,外加电场方向与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷区变窄,有利扩散运动继续进行,而不利于漂移运动,使  $P$  区和  $N$  区的多数载流子顺利地通过  $PN$  结,同时外部电源又不断提供空穴和电子,形成较大的持续电流,其方向从  $P$  到  $N$ ,称为正向电流。此时  $PN$  结处于导通状态,所呈现的电阻(正向电阻)很小。

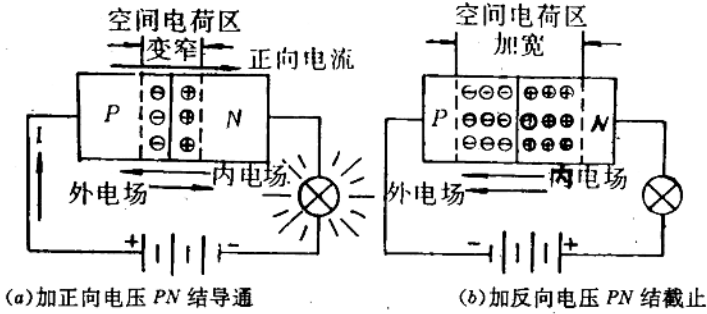


图 1-4  $PN$  结的单向导电性

当  $PN$  结两端加反向电压时,即  $N$  区接电源正极, $P$  区接电源负极,如图 1-4(b)所示,灯泡不亮。因为此时  $PN$  结上外加电场方向与内电场方向一致,使空间电荷区变宽,内电场加强,多数载流子扩散受到更大阻碍,而少数载流子的漂移运动却得到加强,由于少数载流子的数量少,所以形成电流很小,此时  $PN$  结呈现的电阻(反向电阻)较大,处于截止状态。在内电场作用下,产生的微小漂移电流为反向电流(或叫反向漏电流),其方向是从  $N$  到  $P$ 。值得注意的是少数载流子是由热运动产生的,当温度升高时,少数载流子的数目增多,因此反向电流受温度影响很大。使用半导体元件时,必须注意环境温度对元件特性的影响。

综上所述, $PN$  结具有加正向电压导通,呈低阻;加反向电压截止,呈高阻的特性——单向导电性。

## 1-2 晶体二极管

晶体二极管简称二极管,它的主要用途是整流、稳压、检波、作开关等。一般的二极管是用硅或锗材料制成的。国产硅管有 2CP、2CZ、2CK 等系列,锗管有 2AP、2AK 等系列。二极管的外形及其图形符号如图 1-5 所示,半导体器件命名方法见书后附录一

### 一、晶体二极管的结构及图形符号

用一个 PN 结做管芯,由 P 区和 N 区各引出一个电极,用管壳封装后,即制成二极管。它具有两个极,P 型半导体的引出线称为正极或阳极(+);N 型半导体的引出线称为负极或阴极(-)。二极管的构造有点接触型和面结合型两种。一般锗管为点接触型,如图 1-6(a)所示。点接触型的二极管,由于 PN 结的面积小,不能承受较大的正向电流和过高的反向电压,多适用于高频检波,脉冲电路及小电流整流电路中。硅管多为面结合型,PN 结的面积较大,所以能承受较大的正向电流和较高的反向电压,适用于低频大功率整流电路。

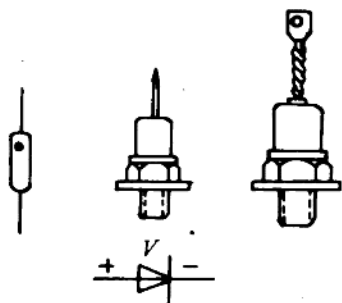


图 1-5 晶体二极管的外形和图形符号

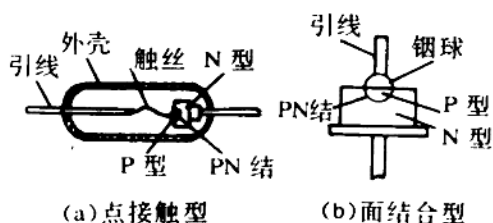


图 1-6 晶体二极管的结构示意图

### 二、晶体二极管的伏安特性

二极管是由一个 PN 结制成的,所以具有 PN 结的单向导电特性。我们通过如图 1-7 所示的实验,测出二极管电流随电压变化的一组数据,根据数据可描绘出  $I=f(U)$  的关系曲线,即是二极管的伏安特性曲线(图 1-8)。

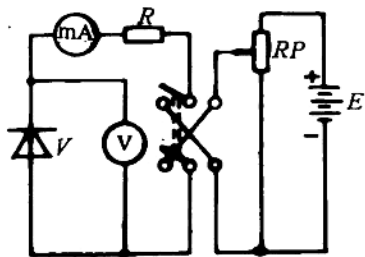


图 1-7 晶体二极管特性的测量电路

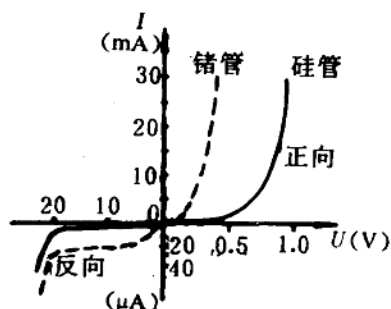


图 1-8 晶体二极管的伏安特性曲线

从特性曲线可以看出：

### 1. 二极管的正向特性

当正向电压很小时，由于外加电场不足以克服内电场对扩散运动的阻力，所以此时正向电流近似为零，出现“死区”，通常把这一段电压称为死区电压。硅管的死区电压约为 0~0.5 伏，锗管约为 0~0.2 伏，当外加电压超过死区电压值时，外电场足以克服内电场对扩散运动的阻力，于是正向电流随着电压的增加迅速上升，这是二极管的正常工作区，即曲线陡直上升部分。在曲线上，对应于某点的电压与电流的比值称为该点的正向电阻，正向电阻很小。曲线上某一小段的电压增量  $\Delta U$  与电流增量  $\Delta I$  的比值称为动态电阻。

### 2. 二极管的反向特性

在二极管两端加反向电压时，只有少数载流子的漂移运动，形成很小的反向电流，可以认为二极管基本不导通，处于截止状态。反向电流越小说明二极管反向电阻越大，截止性能越好。由图 1-8 可见，硅管反向电流比锗管小得多，所以硅管比锗管的截止性能好。当反向电压不超过某一范围时，反向电流基本不随电压变化，当反向电压增加到一定值后，反向电流将急剧增加，二极管便失去单向导电性，这种现象叫反向击穿。发生击穿的原因是外加电场强制把半导体材料外层电子拉出来，使载流子迅速增多，反向电流越来越大，导致击穿。我们把产生击穿时加在二极管两端的反向电压值称为反向击穿电压。普通二极管受到反向击穿便会损坏。

晶体二极管的特性受温度影响很大，当温度升高时，正反向电流都随之增大，因而反向击穿电压则下降。

## 三、晶体二极管的主要参数

晶体二极管的主要参数有两个：

### 1. 最大整流电流 $I_{FM}$

这是指二极管长时间使用时，所允许流过的最大正向平均电流。使用时不得超过这个值，否则会把 PN 结烧坏。对大功率二极管，为了防止过热，需加装散热片，或采取风冷，水冷等措施提高散热效果。

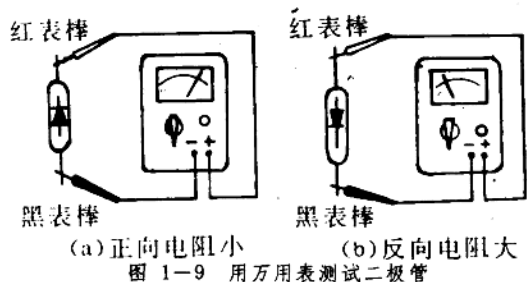
### 2. 最高反向电压 $U_{RM}$

这是指二极管工作时所能承受的反向电压峰值，为了防止二极管反向击穿，使用电压必须小于这个值。

除以上两个参数以外，手册上还给出最高工作频率，最大反向电流、最高使用温度等参数。

## 四、使用万用表测二极管

二极管的性能好坏和正负极性的判断，可以用万用表进行简单测试。测量时使用万用表的欧姆档，把量程拨至  $R \times 100$  或  $R \times 1k$  的位置，用红、黑两只表棒，分别正接和反接测量二极管的两端，如图 1-9 所示，可测出较小的正向电阻，一般是几百欧；较大的反向电阻，一般是几百千欧，这样测量的结果说明二极管是好的。如果正反向电阻均为零，说明二极管已击穿，失去单向导电性。测得正反电阻均为无限大时，说明二极管已断路。在正反电阻测量中，阻值较小时，黑棒所接为二极管正极，红棒所接则是负极，因为红棒对表内电池是接负极，黑棒对表内电池接的是正极。



### 1-3 晶体三极管

晶体三极管简称三极管，它主要用于放大电路和开关电路。在精密测量和自动检测仪表及自动控制系统电路中，经常需要把微弱的电信号加以放大，变成较大的电信号以便测量或用来推动执行机构。三极管是放大电路中的主要元件，常见的三极管外形如图 1-10 所示。学习三极管的结构及分析其载流子的运动规律，能更好地理解三极管的电流放大原理。

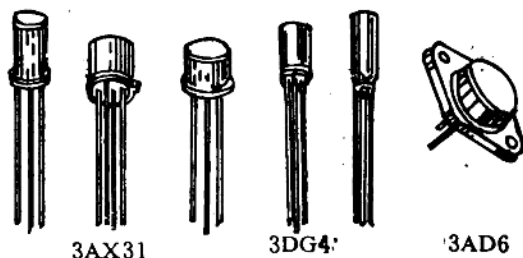


图 1-10 几种晶体管的外形

#### 一、晶体三极管的结构

三极管由三层半导体制成，有 *PNP*、*NPN* 两种类型。三层半导体就是三极管的三个区，即发射区、基区和集电区。由三个区引出三个极为发射极 (*E*)、基极 (*B*)、集电极 (*C*)。三区之间形成两个 *PN* 结，集电区与基区之间的 *PN* 结称为收集结，又称集电结；发射区与基区之间的 *PN* 结称为发射结。常用的三极管有硅平面管和锗合金管。硅平面管多为 *NPN* 型，锗合金管一般为 *PNP* 型。锗合金管的结构简图，示意图及图形符号如图 1-11 所示。

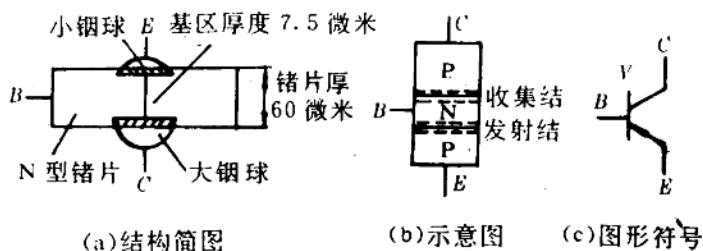


图 1-11 锗合金管

锗合金管的结构是在  $N$  型锗片两边各放一个钢球,用高温烧结的方法,制成两个  $PN$  结,小钢球一边掺杂浓度较大的  $P$  区为发射区,大钢球一边掺杂浓度较小的  $P$  区为集电区,中间的  $N$  型基区做得很薄,只有几微米~几十微米,而且掺杂很轻,3AX1、3AX2、3AG71 等管均属此种结构的三极管。

图 1-12 所示为硅平面管的结构简图、示意图及图形符号。

硅平面管结构是在  $N$  型硅片上,通过氧化、光刻、扩散等工艺先制成一个  $P$  区,然后在这一  $P$  区上再制成一层  $N$  型发射区,3D 系列管都属于此种结构的三极管。

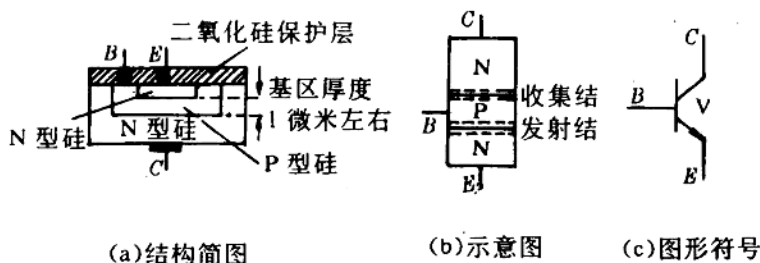


图 1-12 硅平面管

综上所述,三极管结构上的特点是基区做得很薄,掺杂轻,而发射区与集电区虽属同类型半导体,但发射区几何尺寸小,掺杂要比集电区重,杂质浓度要比集电区高。

## 二、晶体三极管的电流放大作用

不论是  $NPN$  型,还是  $PNP$  型三极管,它们的工作原理基本相同,但  $NPN$  管注入基区的载流子是电子, $PNP$  型管注入基区的载流子是空穴。所以二者工作时外加电压及各极电流方向相反。下面以  $NPN$  型管为例通过实验来说明三极管的电流放大作用,实验电路如图 1-13 所示。要使晶体三极管具有放大作用,必须在三极管的发射结加正向电压,这个电压称为正向偏置电压,一般为零点几伏。而在收集结应加反向电压,这个电压称为反向偏置电压,这样就使集电极电位高于基极电位,于是在收集结上有一较强的电场,把发射区注入到基区中的载流子大部分都拉向集电区,形成集电极电流。

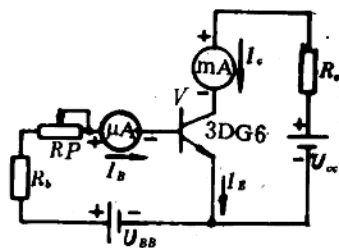


图 1-13  $NPN$  三极管的线路图

当调节图 1-13 中电位器  $RP$  时,基极电流  $I_B$ ,集电极电流  $I_C$  和发射极电流  $I_E$  都发生变化,将测量所得各组数据列于表 1-1:

表 1-1 3DG6 的实验数据

| 电流 \ 测量次数        | 1    | 2     | 3    | 4     | 5     |
|------------------|------|-------|------|-------|-------|
| 基极电流 $I_B$ (微安)  | 10   | 28    | 40   | 65    | 110   |
| 集电极电流 $I_C$ (毫安) | 0.99 | 1.972 | 2.96 | 4.935 | 9.89  |
| 发射极电流 $I_E$ (毫安) | 1.00 | 2.00  | 3.00 | 5.00  | 10.00 |

分析实验所得数据可总结出以下规律:

1. 三个电流间的关系符合克希荷夫定律

$$I_E = I_C + I_B \quad (1.1)$$

并且基极电流  $I_B$  很小, 而集电极电流  $I_C$  与发射极的电流  $I_E$  相差不多

$$I_B \ll I_C \approx I_E \quad (1.2)$$

2. 基极电流  $I_B$  的微小变化 ( $\Delta I_B$  很小) 能引起集电极电流  $I_C$  的很大变化 ( $\Delta I_C$  很大), 例如从 1、2 两次的实验数据可得:

$$\Delta I_B = 28 - 10 = 18 (\mu A) = 0.018 (mA)$$

$$\Delta I_C = 1.972 - 0.99 = 0.982 (mA)$$

则 
$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{0.982}{0.018} \approx 54$$

计算表明  $I_C$  的变化量是  $I_B$  的变化量的 54 倍, 由此得出结论: 用一个小信号  $\Delta I_B$  可以控制一个较大的信号  $\Delta I_C$ , 这就是晶体管的电流放大作用。

### 三、晶体管的电流放大原理

三极管电流放大作用的内部条件是在它的结构上所具有的特点, 外部条件是必须在发射结加上正向电压, 在集电结加上反向电压。为了进一步理解晶体管的电流放大原理, 我们仍以 NPN 型管为例, 讨论三极管内部载流子的运动过程, 如图 1-14 所示。

1. 发射区向基区发射电子的过程

由于发射结加正向电压, 扩散运动大于漂移运动, 于是发射区中的多数载流子——电子源源不断地越过 PN 结到达基区, 形成发射极电流  $I_E$  (电流方向与电子运动方向相反)。而基区中的多数载流子——空穴的浓度很小, 所以空穴电流可略去不计, 可以认为发射极电流仅由电子电流构成。

2. 电子在基区的扩散与复合过程

当集电极回路接通电源后, 就有  $U_{CC}$  加在发射极和集电极之间, 此时, 因发射结是正向偏置, 其正向电阻很小, 集电结是反向偏置, 其反向电阻很大, 所以  $U_{CC}$  的绝大部分作用在收集结上, 因此在收集结附近形成较强电场。从发射区注入基区的电子, 在靠近发射结的

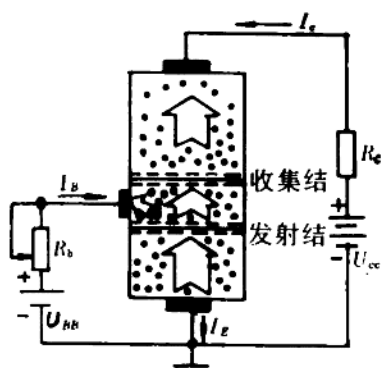


图 1-14 晶体管中载流子的运动



一侧浓度大,靠近集电结的一侧浓度低,由于浓度的差别,使这些电子的扩散运动继续向集电区方向进行。扩散的同时电子又与基区的空穴相遇而复合,但由于基区很薄,掺杂又轻,而且有集电结附近的强电场作用,所以进入基区的电子只有极少数与空穴相复合,形成很小的基极电流  $I_b$ ,而绝大多数未来得及复合就被集电结电场所吸引,到达集电区形成集电极电流  $I_c$ ,电子在基区的扩散远远大于复合,使得  $I_c \gg I_b$ ,这就是三极管电流放大作用的基础。

### 3. 集电区收集电子的过程

由于收集结处于反向偏置,所以集电区的多数载流子——电子无法向基区扩散,而基区中由发射区扩散过来的电子却绝大部分被拉向集电区,形成较大的集电极电流  $I_c$ 。以上所述是以 *NPN* 型管为例,*PNP* 型管的工作原理与其相同,只是注入基区的载流子是空穴而不是电子。

## 1-4 晶体三极管的特性曲线

三极管的各极电流、电压关系可以用特性曲线表示,常用的有输入特性和输出特性曲线。这些曲线可以直接在晶体管特性图示仪上显示出来,也可以根据实验数据描绘出来。图 1-15 所示为测量三极管的输入特性和输出特性的电路。

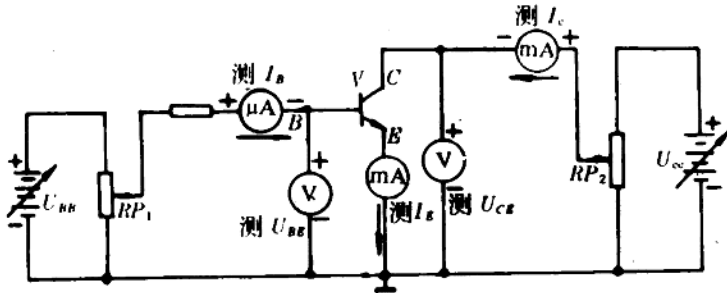


图 1-15 测量晶体管特性的电路

### 一、输入特性

输入特性是指集电极与发射极之间电压  $U_{CE}$  为一定值时,基极电流  $I_B$  与电压  $U_{BE}$  之间的关系即:

$$I_B = f(U_{BE}) | U_{CE} = \text{常数}$$

#### 1. $U_{CE} = 0$ 伏时的输入特性曲线

调节图 1-14 中电位器  $RP_2$ ,使  $U_{CE} = 0$  (即把集电极和发射极短接)。此时晶体管的发射结和收集结相当于两个并联的二极管,并且均处于正向偏置。然后调节电位器  $RP_1$ ,可以改变  $I_B$  及其对应的  $U_{BE}$  的大小,得出一系列对应数据,逐点描绘即可得出  $U_{CE} = 0$  时的输入特性曲线,如图 1-16 所示的曲线 I。它与二极管的正向特性相似。

#### 2. $U_{CE} \geq 1$ 伏时的特性曲线

调节图 1-15 电路中的  $RP_2$  使  $U_{CE} \geq 1$  伏,再调节  $RP_1$  测得另一组数据,可绘出图 1-16 所示的曲线 II。比较曲线 I 和 II 可见  $U_{CE} \geq 1$  伏的曲线相对于曲线 I 向右移动一段距