



煤矿技工学校试用教材

# 电子技术基础



煤炭工业出版社

新华书店

## 内 容 提 要

本书主要介绍半导体基本知识和基本电路的工作原理,并结合煤矿的特点选择了一些典型电路进行分析。全书共分八章:晶体管及其特性,低频交流放大电路,晶体管正弦波振荡器,直流放大器,线性集成运算放大器,整流稳压电路,脉冲与数字电路,可控硅电路等。

本书为煤矿技工学校综采电气专业的统编教材。煤矿电修专业,井下电钳专业等可以选讲有关内容。本书也可供煤矿技术工人培训和自学之用。

责任编辑:李淑琴 孙永绪

煤矿技工学校试用教材

电子技术基础

张明高编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平门内大街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092\text{mm}^{1/16}$  印张 $14\frac{1}{2}$

字数341千字 印数1—15,080

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0050-X/TD·48

书号 2963

定价 3.10元

## 前 言

为了适应煤矿技工学校教学和技工培训改革的需要,加速煤矿工人智力的开发和培养,促进煤炭工业现代化生产建设的发展和技术进步,煤炭部劳资司于1985年成立了全国煤矿技工教材编审委员会,对全国煤矿技工教材建设工作进行了全面规划,并确定编写一套具有煤矿特点的中级技工教材。这套教材包括:《矿山电工》、《机械制图》、《综采工作面采煤机》、《煤矿开采方法》、《机械化掘进工艺》、《煤矿地质》、《煤矿测量》、《电子技术基础》等共60余种。

这套教材主要适用于煤矿技工学校和煤矿中级技工正规培训需要,也适合具有初中文化水平的工人自学和工程技术人员参考。

《电子技术基础》是这套教材中的一册,由淮北矿务局技工学校张明高同志主编,双鸭山矿务局阎善勋同志和宋继国同志主审,经淮北、铜川、天府等技工学校的有关教师多次修改审定,煤炭部劳资司的有关同志具体组织并参加审定修改工作。

由于时间仓促、经验不足,书中难免有不妥之处,请使用单位及读者提出批评指正。

全国煤矿技工教材编委会

一九八八年四月八日

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第一章 晶体管及其特性</b> .....   | 1   |
| 第一节 半导体基本知识 .....          | 1   |
| 第二节 晶体二极管 .....            | 4   |
| 第三节 晶体三极管 .....            | 6   |
| 第四节 用万用表测试晶体管 .....        | 13  |
| 习题一 .....                  | 16  |
| 实验一 基本训练 .....             | 16  |
| <b>第二章 低频交流放大电路</b> .....  | 18  |
| 第一节 单管低频交流放大电路 .....       | 18  |
| 第二节 工作点稳定的偏置电路 .....       | 27  |
| 第三节 放大电路的等效分析法 .....       | 28  |
| 第四节 单管低频放大电路的设计 .....      | 32  |
| 第五节 多级放大器 .....            | 34  |
| 第六节 功率放大器 .....            | 37  |
| 第七节 反馈放大器 .....            | 42  |
| 第八节 射极输出器 .....            | 50  |
| 习题二 .....                  | 53  |
| 实验二 分压式电流负反馈电路的安装和调试 ..... | 57  |
| 实验三 乙类推挽功率放大器安装和调试 .....   | 58  |
| <b>第三章 晶体管正弦波振荡器</b> ..... | 60  |
| 第一节 谐振回路 .....             | 60  |
| 第二节 调谐放大器 .....            | 64  |
| 第三节 LC振荡器 .....            | 66  |
| 第四节 正弦波振幅的调制与解调 .....      | 69  |
| 第五节 煤矿动力载频发射机与接收机 .....    | 72  |
| 习题三 .....                  | 74  |
| 实验四 LC振荡器 .....            | 75  |
| <b>第四章 直流放大器</b> .....     | 77  |
| 第一节 概述 .....               | 77  |
| 第二节 差动式放大器 .....           | 79  |
| 习题四 .....                  | 83  |
| <b>第五章 线性集成运算放大器</b> ..... | 85  |
| 第一节 概述 .....               | 85  |
| 第二节 线性集成运放的基本单元电路 .....    | 86  |
| 第三节 线性集成运放的基本接法和基本功能 ..... | 92  |
| 第四节 常用的典型集成运放电路 .....      | 97  |
| 第五节 线性集成运放的基本运算 .....      | 101 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第六节 线性集成运放的应用举例—— $U_{71}$ 型检漏继电器 ..... | 106 |
| 习题五 .....                               | 108 |
| <b>第六章 整流稳压电路</b> .....                 | 111 |
| 第一节 整流电路 .....                          | 111 |
| 第二节 滤波电路 .....                          | 116 |
| 第三节 硅稳压管稳压电路 .....                      | 119 |
| 第四节 晶体管串联型稳压电路 .....                    | 122 |
| 第五节 稳压电源的保护措施 .....                     | 125 |
| 习题六 .....                               | 127 |
| 实验五 单相桥式整流滤波电路的组装、调试和测试 .....           | 128 |
| <b>第七章 脉冲与数字电路简介</b> .....              | 130 |
| 第一节 概述 .....                            | 130 |
| 第二节 晶体管开关特性 .....                       | 131 |
| 第三节 RC电路 .....                          | 135 |
| 第四节 反相器 .....                           | 139 |
| 第五节 双稳态触发器 .....                        | 142 |
| 第六节 射极耦合双稳态触发器 .....                    | 149 |
| 第七节 单稳态触发器 .....                        | 151 |
| 第八节 多谐振荡器 .....                         | 154 |
| 第九节 自激间歇振荡器 .....                       | 156 |
| 第十节 门电路 .....                           | 157 |
| 第十一节 数字电路简介 .....                       | 164 |
| 习题七 .....                               | 178 |
| 实验六 双稳态触发器 .....                        | 180 |
| 实验七 多谐振荡器 .....                         | 181 |
| <b>第八章 可控硅电路</b> .....                  | 183 |
| 第一节 可控硅的原理及特性 .....                     | 183 |
| 第二节 可控硅主电路 .....                        | 186 |
| 第三节 可控硅触发电路 .....                       | 198 |
| 第四节 可控硅串并联及其保护 .....                    | 205 |
| 第五节 可控硅应用举例——电动机的无级调速 .....             | 209 |
| 习题八 .....                               | 211 |
| 实验八 可控硅直流开关 .....                       | 212 |
| 附录 .....                                | 213 |

# 第一章 晶体管及其特性

## 第一节 半导体基本知识

### 一、半导体的特性

我们在电工学中曾学过导体和绝缘体，它们都是根据导电能力区分的。在我们周围还有一部分物质，如锗、硅、硒等。它们的导电性能既不象导体又不象绝缘体，而介于导体与绝缘体之间，我们称这类物质为半导体。

半导体早已被人们所发现，并被广泛的应用于工农业生产和国防、科研之中，半导体在整个国民经济中占据了极其重要的地位。半导体之所以能这样被广泛应用，主要原因并不在于它的导电性能介于导体与绝缘体之间，而是因为它具有下列特性：

(1) 半导体对温度的敏感性很强，它的导电性随温度的变化而急剧变化。利用这种特性可制成热敏元件。

(2) 半导体对光的敏感性很强，在光线照射下会使半导体导电能力大大提高。利用光敏特性可制成光敏元件，作为光电控制。

(3) 纯净的半导体（本征半导体）不易导电，但只要掺入微量的“杂质”，其导电能力就会成百万倍增加，这一宝贵特性是导体和绝缘体所没有的，利用这个特性可制成晶体管。

下面从原子结构上来解释半导体的上述特性。

我们知道，物质是由原子构成的。以硅原子为例（如图1-1所示），一个硅原子由带正电荷的原子核和围绕着他旋转的14个带负电荷的电子组成。14个电子按一定的规律分布在三层电子轨道上。由于原子核是带14个电子电量的正电，故正常情况下原子呈中性。离原子核较近的两层电子轨道上的10个电子，由于受原子核的束缚较大，不易活动，所以它和原子核组成一个惯性核，对外呈现 $14 - 10 = 4$ 个电子量，如图1-2所示，而最外层4个电子，离原子核较远，受原子核束缚较小，活动性较大，叫做价电子。硅和锗原子都有4个价电子，叫四价元素。每一元素的导电能力与价电子有很大关系。

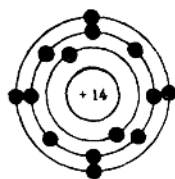


图 1-1 硅原子结构平面图

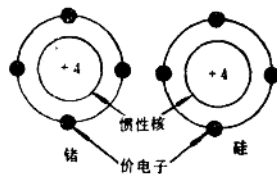


图 1-2 原子结构图

硅和锗等半导体材料都是晶体结构，因此，半导体管又称晶体管。一块晶体由许多小晶体粒组成。在每一个晶体粒内，原子是有规律的整齐地排列着，如图1-3所示。每个硅

原子受邻近 4 个原子的束缚，原子与原子之间的价电子象手拉手似地联接在一起，组成 4 个共价键，共价键上的电子除受本身原子核的约束外还受价键约束，所以纯净半导体（本征半导体）在常温下不导电。

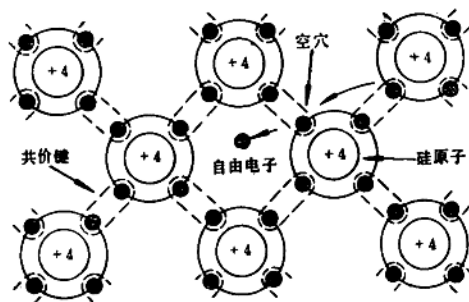


图 1-3 硅晶体结构平面图

晶体在受热或光激发时，价键电子获得足够能量，少量价电子有可能脱离共价键的束缚，而成为自由电子。同时在原来的位置上就留下一个空位，叫空穴（因此电子和空穴总是成对出现，称为电子——空穴对。若电子和空穴结合则称为复合）。有了这样一个空穴，附近的共价电子就很容易过来填补，同时又会出现新空穴位，这个新空穴位又会被其邻近的共价电子填补，这样依次填补形成价电子运动。脱离共价键的自由电子带负电，而空穴失去电子则带正电。这时由于半

导体中存在自由电子和空穴，若在其两端加上适当的直流电压，自由电子将向正极移动，而移动的自由电子留下的空穴向负极移动，于是在电路中就形成了电流。电路中形成的电流由两部分组成，即自由电子移动和空穴移动组成。前者叫电子导电，后者叫空穴导电。

综上所述，流过外电路的电流是电子电流和空穴电流的代数和。由于自由电子和空穴的移动能起导电作用，是载运带电粒子，故称它们为载流子。电子-空穴对的产生除了与温度和光有关外，还与掺入杂质数量有关。

## 二、P型半导体与N型半导体

前面讲过，在纯净的半导体中掺入微量的杂质，其导电性能成百万倍增加。所谓“杂质”就是指另一种元素。由于掺入的元素不同，可生成两种新半导体，即P型半导体和N型半导体。

### 1. P型半导体

如果在纯净的半导体中掺入微量的三价元素，如硼、铝、镓等，它们的最外层电子只有 3 个，进入纯净的半导体后与周围原子结成共价键时，还缺少一些电子，这就形成了空穴。空穴是带正电荷的，这种半导体参与导电的主要是空穴，所以被称为空穴型半导体，亦叫P型半导体。应该指出，原子的热运动所引起的热激发会使P型半导体中产生少量的电子-空穴对。除空穴参与导电外，电子也参与导电，只是电子是少数，因此，这里称空穴为多数载流子（简称多子），电子为少数载流子（简称少子）。P型半导体的结构平面图如图1-4a所示。

### 2. N型半导体

如图在纯净的半导体中掺入微量的五价元素，如磷。因为磷的最外层有 5 个电子，除其中 4 个和周围原子结成共价键外，还多余 1 个电子，这个电子不受共价键约束，而形成自由电子。在外电场作用下，这些自由电子参与导电，形成电子电流，这种主要依靠电子导电的半导体称之为电子型半导体，亦称N型半导体。同样热激发时也产生少量的电子-空穴对，除电子参与导电外，空穴也参与导电，故在N型半导体中电子被称为多数载流子（多子），空穴被称为少数载流子（少子）。N型半导体的平面结构如图1-4b所示。

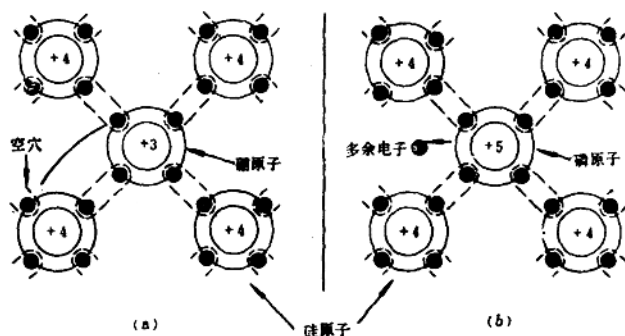


图 1-4 P型和N型半导体

### 三、PN结的形成

我们在中学里做过这样的物理实验，在一盆清水的两侧分别滴入几滴红墨水和蓝墨水，两种颜色的墨水在水中就会进行扩散，结果使清水变成浅紫色。这是因为两边所含的红、蓝墨水分子浓度不同，浓度大的向浓度小的一边扩散所造成的。在高温下我们把P型半导体和N型半导体烧结在一起时，如图1-5所示。同样因浓度的差异，P型半导体中的空穴要向N型半导体中扩散，N型半导体中的电子要向P型半导体中扩散。扩散结果，在P型和N型半导体的接触面附近，P型半导体一边失去空穴而带负电，而N型半导体一边失去电子而带正电，这样在P型和N型半导体之交界面就出现了一个空间电荷区。这个空间电荷区所产生的电场叫势垒电场。电场方向由正指向负，即由N型半导体指向P型半导体。在势垒电场作用下，扩散运动逐渐减弱，而两种半导体中的少数却在电场作用下向对方运动，我们称少数运动为漂移运动。在扩散与漂移运动达到动态平衡时，两个半导体之间就形成了PN结。这个PN结又叫阻挡层或耗尽区。

### 四、PN结的单向导电性

当P型半导体接电源正极，N型半导体接电源负极时（这种接法称正向连接或者叫PN结正向偏置，简称正偏），如图1-6a所示。这时外加电场与PN结内电场方向相反，结果结内电场被削弱，破坏了原来扩散运动和漂移运动的平衡，使扩散运动占了优势，一部分电子便由N区向P区扩散，一部分空穴由P区向N区扩散，这些电子和空穴在外加电场作用下，分别奔向电源正极和负极，半导体内便有较大的电流通过，这个电流叫正向电流。随着外加电压的增加，结内电场进一步被削弱，扩散作用更强，电流将迅速增长。

值得注意的是，外加正向电压削弱内部电场力的作用过程，也就是PN结空间电荷区变窄的过程。外加电场驱使P区的空穴向右移，驱使N区的电子向左移，从而使原来空间电荷区的正负粒子得到中和，空间电荷数量减少即PN结变窄了，结内电场被削弱，使扩散作用加剧，同时外部电源不断地向半导体提供空穴与电子，使电流维持下去。

当P型半导体接电源负极，N型半导体接电源正极（称此为反向连接，或叫PN结反偏），外加电场与结内电场方向一致，如图1-6b所示。它加强了内电场作用，使扩散运动无法进行下去。但这时漂移运动仍在进行，即P区的电子移向N区，N区的空穴移向P

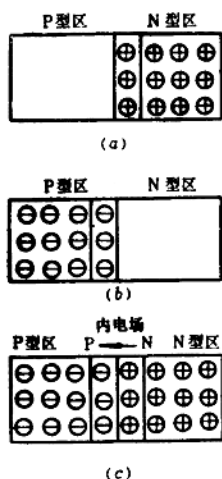


图 1-5 PN结的形成

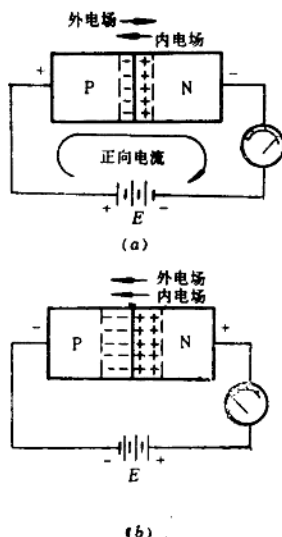


图 1-6 PN结的单向导电性

区,此时虽然可以形成电流,但这是少子运动所形成的,因此这个电流很小,称之为反向电流。一般只有几十到一、二百微安。因而有时也可以认为加反向电压时不导电。这就是PN结的单向导电性。

PN结的这一特性是构成晶体二极管、晶体三极管、可控硅及其它半导体器件的基础。

## 第二节 晶体二极管

### 一、晶体二极管的结构

晶体二极管有一个正极和一个负极,实质上它是把一个PN结封装在管壳里构成的。由P型区引出线做为正极,N型区引出线做负极,符号如图1-7所示。按照晶体二极管内部结构,可以分成点接触型和面接触型两种,如图1-8所示。其中a为点接触型,b为面接触型。

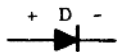


图 1-7 二极管符号

点接触型其接触面积小,它的结电容小,适用于高频,常用在检波、脉冲技术中。面接触型PN结的接触面积大,可以通过大电流,适用于作整流用。它的结电容大,不适用于高频场合用。

### 二、晶体二极管的伏安特性曲线

晶体二极管的伏安特性曲线是表明二极管两端电压和电流之间的关系曲线。

我们可以用图1-9所示电路来测晶体二极管的伏安特性。三刀双掷开关向上接通时可测二极管的正向伏安特性,向下接通时可测二极管的反向伏安特性。

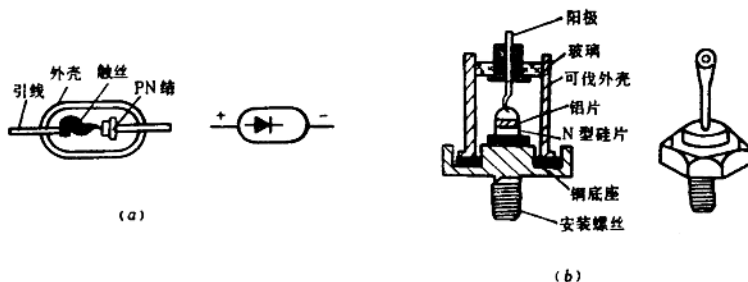


图 1-8 晶体二极管

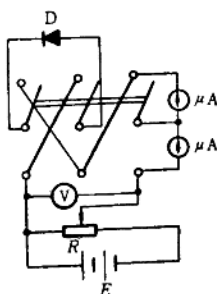


图 1-9 测试晶体二极管伏安特性电路

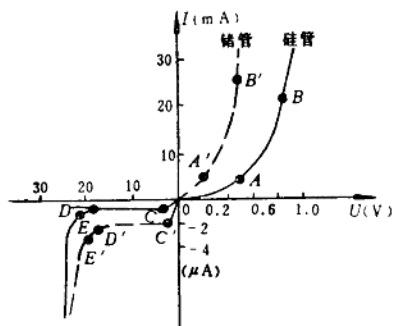


图 1-10 晶体二极管伏安特性曲线

现以图1-10所示的锗和硅二极管伏安特性曲线进行分析：

### 1. 正向特性

从图1-10所示的伏安特性曲线上看，当二极管两端电压为零时，流过二极管的电流亦为零；当二极管两端所加正向电压很小时，外加电压不能克服PN结内电场的作用时，电流很小，如图1-10所示曲线0A(0A')段；当所加正向电压达到一定数值（锗管0.2~0.4V，硅管0.6~0.8V）时，流过二极管电流随电压的变化而变化，如图1-10曲线的AB(A'B')段。正向电流的上升率锗管比硅管大。

### 2. 反向特性

当二极管加反向电压时，最初，随着反向电压的逐渐增大（大约在0~-1V范围内）反向电流也跟着逐渐增大，这是由于外加电场方向和内电场方向一致，使结内电场增强，在内电场作用下漂移电流容易通过PN结而增大，所以反向电流增大，如图1-10曲线的0C(0C')段；当反向电压超过-1V时，外加电场的作用使扩散电流更无法通过PN结，而少数载流子已全部参与导电，因此反向电流不再增大，如图1-10曲线的CD(C'D')段，这时的电流叫反向饱和电流。在室温下，硅二极管的反向饱和电流为一微安到几十微安，而锗二极管的反向饱和电流约为几十微安到几百微安。但是，随着温度升高，由热激发所产生的少数载流子将会增加，因此反向饱和电流也增大。

当外加反向电压继续上升到一定数值时，PN结内、外电场已增强到能够把结内被约束的共价键电子，从共价键上强行拉出来，从而产生大量的自由电子和空穴，同时，由于通过PN结的少数载流子，被外加电场加速产生了很大的动能，把共价键上的共价电子撞

击出来,并引起连锁反应,也能产生大量的自由电子和空穴,这样,将造成反向电流突然增大,如图1-10曲线 $E(E')$ 点以下的情况。这种现象称为反向击穿。二极管反向击穿后,反向电流随反向电压增加而急剧增大,造成管子损坏。

从以上分析,得知晶体二极管的伏安特性主要是由正向特性和反向特性两部分组成。

### 三、晶体二极管的主要参数

晶体二极管的寿命很长(可达十万小时以上),但只有正确使用才能保证它的寿命。要正确使用,必须掌握晶体二极管的主要参数,以便合理选用管子。晶体二极管的主要参数有:

(1) 最大正向电流 $I_M$ ——指长期运行时,晶体二极管所允许通过的最大正向电流值。电流通过二极管时,管子发热,如果电流过大,超过允许值时,PN结会因结温过高而烧坏。因此,使用二极管时,正向电流不应超过管子所规定的最大正向电流值。

大功率二极管整流电流较大,发热量也大,为了降低管子的温度,需要安装散热片以帮助散热。

(2) 反向击穿电压 $U_{KM}$ ——指晶体二极管所能承受的反向电压值。当反向电压超过此值时,管子将被反向击穿,二极管便失去整流作用。

(3) 反向电流 $I_{KM}$ ——指二极管两端加上最高反向工作电压时的反向电流值。此值愈小愈好。反向电流大,说明管子特性不好。

(4) 最高使用温度 $T_M$ ——指晶体二极管长期运行时,不致使管子损坏的最高工作温度。

## 第三节 晶体三极管

### 一、晶体三极管的结构

晶体二极管我们在前节已作了介绍,它有两个电极,一个PN结,具有单向导电性。但在生产实际中应用更多的是晶体三极管,晶体三极管有三个电极,由两个PN结组成,它可以用来放大信号,作为可变电阻和开关等等,故广泛应用于电子设备中。

晶体三极管的三个电极分别为发射极(用e表示)、集电极(用c表示)、基极(用b表示),外形如图1-11所示。



图 1-11 晶体三极管外形

从内部结构上,晶体三极管是由不同材料组成PNP或NPN三层结构。前者称为PNP型三极管,后者称为NPN型三极管。其结构示意图和符号如图1-12所示。

PNP型三极管和NPN型三极管,分别有三个区:发射区、基区、集电区。对应这三个区分别引出三个电极:发射极e、基极b、集电极c。通常基区做的很薄(约几微米),这样就形成了两个很靠近的PN结。PNP型管和NPN型管的工作原理都相同,只是在使用时电源极性不同。

应该指出,虽然发射区与集电区都是同类型半导体(都是N型或都是P型),但发射区掺杂浓度比集电区大,以便发射更多的载流子。而集电区的面积比发射区大,便于收集载流子。因此晶体三极管的三个极不是对称的,一般情况下不能随意将发射极与集电极互换

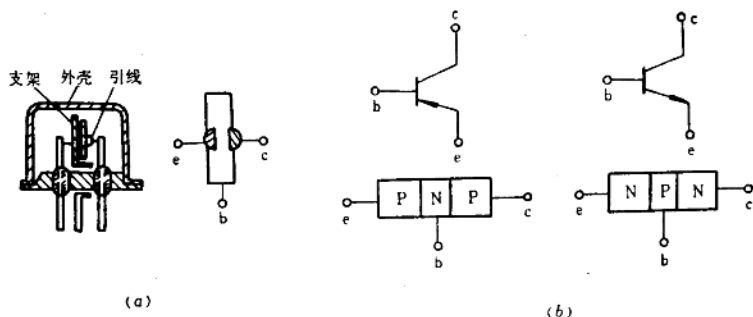


图 1-12 晶体三极管结构示意图与符号

使用。只有在特殊情况下，才可调换使用，这一点在脉冲电路中将涉及到。

## 二、晶体三极管的电流放大作用

晶体三极管最基本的作用是放大。所谓放大就是把微弱信号送入由三极管组成的放大电路中，然后被转换成具有一定强度的电信号输出。

一只晶体三极管组成的放大电路可以把输入信号放大到几倍或几十倍。把数级放大电路串在一起就可将输入信号放大到几千倍、几万倍乃至更高。晶体三极管之所以能起放大作用，是由它本身的性质和内部结构所决定的。要使晶体三极管能起放大作用，还必须给晶体管加上适当的工作电压，即发射结加正向电压，集电结加反向电压。

### 1. 晶体三极管的工作电压

图1-13是由一只NPN型管组成的基本放大电路。

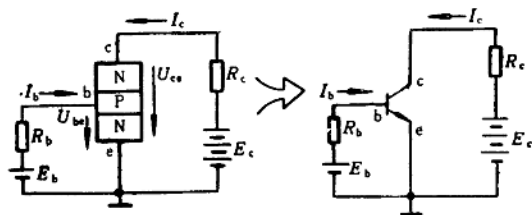


图 1-13 晶体管放大电路

通常在晶体三极管的发射极e和基极b之间加上一个正向电压 $U_{be}$ ，而在集电极c和发射极e之间加上一个使集电结处于反向偏置的电压 $U_{ce}$ ，如图1-13所示。因为对NPN型管来说，发射区是发射电子的，这些电子进入基区后越过集电结到达集电区时才形成集电极电流。而只有在发射极和基极之间加正向电压使发射结正偏时，才能保证发射的电子不断地向基区扩散。这些电子恰好在集电结内电场和外加在集电结的反向电压作用下，很容易漂移到集电区，奔向集电极，形成集电极电流。

对于PNP型管来讲，发射区主要是用来发射空穴的，这时只要将图1-13中 $E_b$ 与 $E_c$ 的极性改变一下，空穴即可扩散到基区，并越过集电结到达集电区。不难看出，这时晶体三极管发射结仍正偏，集电结仍反偏。

基极和发射极之间电压 $U_{be}$ 常称为基极电压,它由电源 $E_b$ 通过电阻 $R_b$ 提供。 $U_{be}$ 一般为零点几伏(锗管约为 $0.2\sim 0.4V$ ,硅管约为 $0.6\sim 0.8V$ )。集电极和发射极之间电压 $U_{ce}$ 常称为集电极电压,它由电源 $E_c$ 供给,一般为几伏到十几伏或更高些。

在晶体三极管各极上加上适当的电压之后,即可正常工作。它构成两个回路:由电源 $+E_b \rightarrow$ 基极 $b \rightarrow$ 发射极 $c \rightarrow -E_b$ ,称为基极回路;由 $+E_c \rightarrow$ 集电极负载电阻 $R_c \rightarrow$ 集电极 $c \rightarrow$ 发射极 $e \rightarrow -E_c$ ,称为集电极回路。

## 2. 晶体三极管内部电流分配

晶体三极管电路接通后,半导体内部的载流子将按着一定规律移动而形成三个电流:即流过发射极的电流 $I_e$ ,流过基极电流 $I_b$ ,流过集电极电流 $I_c$ ,如图1-14。由于发射结加正向电压,因此有较大的电流由发射区流向基区,这就是发射极电流 $I_e$ 。它由两部分组成:一部分是由发射区的多子—电子向基区注入;一部分由基区中的多子—空穴向发射区注入。虽然它们移动的方向相反,但由于它们所带电荷电性也相反,故形成电流方向是一致的,都是由基区到发射区。发射极电流是这些电子流与空穴流之和。由于在制造三极管时,加入基区的杂质浓度远小于加入发射区杂质的浓度,而基区又做的很薄,因此,由基区注入发射区的空穴数量远小于发射区注入基区的电子数目。这样,发射极电流 $I_e$ 可以看成主要是由电子流组成。

发射区电子进入基区后,由于基区做的很薄,电子很快扩散到集电结边缘,并在集电区电场作用下,大部分电子穿过集电结进入集电区,形成集电极电流 $I_c$ 。只有一小部分(约占10%)与基区中空穴复合。与此同时,基极正向电压又不断从基区拉走电子,连续地为基区提供空穴,使复合运动继续进行。电子复合的数量与被拉走的电子数量相等,形成了基极电流 $I_b$ 。所以,基极电流就是电子在基区和空穴复合的结果。

由此可以得出,基极电流与集电极电流之和,就是发射极电流 $I_e$ 。即

$$I_e = I_b + I_c \quad (1-1)$$

(1-1)式表达了晶体三极管内部电流的分配关系,这个关系是由晶体三极管内部结构特性所决定的。

## 3. 晶体三极管的电流放大作用

按晶体三极管要求的工作电压,接成图1-15所示电路。图中3块电流表分别测量基极电流 $I_b$ ,集电极电流 $I_c$ 和发射极电流 $I_e$ 。基极回路中 $10k\Omega$ 电阻用来限制基极电流,起保护晶体管的作用。调节电位器为 $330k\Omega$ ,可以改变基极电流大小,得出在不同的基极电流下

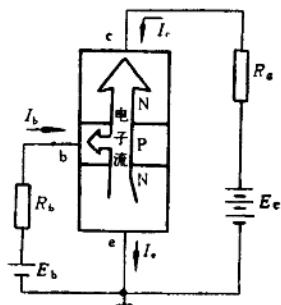


图 1-14 晶体三极管中的电流分配

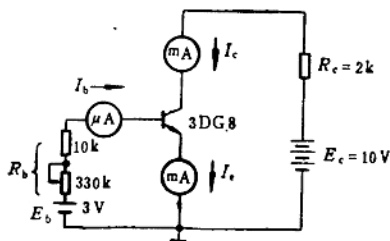


图 1-15 晶体三极管电流放大作用

所对应的集电极电流和发射极电流。其实验数据列入表1-1中（本实验均采用3DG8B）。

表 1-1 晶体三极管电流分配

| 实验次数<br>电 流(mA) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| $I_b$           | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| $I_c$           | 0.44 | 1.10 | 1.77 | 2.45 | 3.20 | 3.90 |
| $I_e$           | 0.45 | 1.12 | 1.80 | 2.49 | 3.25 | 3.96 |

从表1-1中可以看出：

(1) 每次实验中， $I_b$ 与 $I_c$ 之和总等于 $I_e$ ，电流分配关系满足(1-1)式。

(2) 基极电流很小，集电极电流和发射极电流相差不大，说明发射区发射的电子大部分都通过基区到达了集电区。

(3) 基极电流微小的变化，可引起集电极电流较大的变化，这就是晶体三极管的电流放大作用。

例如，当 $I_b$ 由0.02mA变到0.06mA时， $I_c$ 从1.10mA变到了3.90mA，两个变化量之比为

$$\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{3.90 - 1.10}{0.06 - 0.02} = 70 \text{倍}$$

即使是同一型号的晶体管，它的放大能力也是不同的。为区别各管子的放大能力，常用集电极电流变化量( $\Delta I_c$ )与基极电流变化量( $\Delta I_b$ )之比来衡量。这个比值称共射极电路的电流放大系数 $\beta$ （或用 $h_{fe}$ 表示）。

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \quad (1-2)$$

$\beta$ 是晶体三极管的重要参数之一，它体现了晶体管的放大能力， $\beta$ 值大小除了由半导体材料的性质，管子的结构和工艺决定外，还与管子工作电流有关。即不同的基极电流，管子的 $\beta$ 值是不同的。

### 三、晶体三极管的特性曲线

为了正确使用晶体三极管，仅仅了解其一般特性是不够的，还必须进一步了解其电特性。晶体管的特性曲线有几种，不同的接线方式有不同的特性曲线。下面主要介绍常用的共发射极电路的静态特性曲线。

常用的共发射极电路特性曲线有两种，即输入特性曲线和输出特性曲线。

图1-16是测绘晶体三极管特性曲线的电路。图中 $E_b$ 、 $E_c$ 为直流电源，电位器 $R_{W1}$ 、 $R_{W2}$ 用来分别调节基极电压 $U_b$ 和集电极电压 $U_c$ ， $R_b$ 为基极限流电阻。微安表、毫安表与伏特表分别测量基极电流 $I_b$ 、集电极电流 $I_c$ 和集电极电压 $U_{ce}$ 。

#### 1. 输入特性曲线

输入特性曲线是表示集电极电压保持某一定值时，加在基极与发射极之间的电压 $U_b$ 和所产生的电流 $I_b$ 之间的关系曲线。

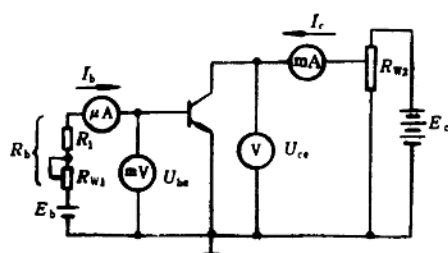


图 1-16 伏安特性测绘电路

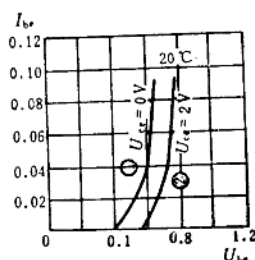


图 1-17 输入特性曲线

如图1-16，调节  $R_{y2}$ ，使输出电压  $U_{ce}$  为某一定值（例如取  $U_{ce} = 0$ ）并保持其值不变。然后逐次改变  $R_{w1}$ ，便可测出不同的输入电压下所对应的输入电流  $I_b$  值。数据如表1-2中所示。

表 1-2  $U_{ce} = 0$  时输入特性数据

|                       |   |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| 输入电压 $U_{be}$ (V)     | 0 | 0.36 | 0.44 | 0.49 | 0.55 | 0.58 | 0.61 |
| 输入电流 $I_b$ ( $\mu$ A) | 0 | 2    | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   |

根据所测数据，可绘出一条  $U_{ce} = 0$  时的特性曲线，如图1-17所示的曲线①。

重新调节  $W_2$ ，使  $U_{ce} = 2V$  时测出  $U_{be}$  与  $I_b$  的对应数据，如表1-3所示。

表 1-3  $U_{ce} = 2V$  时输入特性

|                       |   |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| 输入电压 $U_{be}$ (V)     | 0 | 0.62 | 0.64 | 0.68 | 0.70 | 0.71 | 0.72 |
| 输入电流 $I_b$ ( $\mu$ A) | 0 | 2    | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   |

根据表1-3数据绘出图1-17所示的曲线②。用同样方法可测绘出  $U_{ce} = 5V$ 、 $10V$  等情况下的输入特性曲线。这样，便可得到一组输入特性曲线。这组特性曲线中包括了  $U_{ce}$ 、 $U_{be}$ 、 $I_b$  三个参量，表示了这三者之间的关系。

当集电极电压  $U_{ce}$  由  $0V$  变到  $2V$  时，基极电流变化比较明显，曲线右移，说明  $U_{ce}$  对输入特性有影响。但实际上当  $U_{ce}$  大于一定数值（如  $1V$ ）时，集电极电压对输入特性的影响就不大了（曲线靠近了）。所以晶体管手册上给出的输入特性曲线往往只有一、二条，当应用输入特性曲线时，如果  $U_{ce}$  大于  $1V$ ，就用  $U_{ce} = 1V$  的特性曲线。

从晶体三极管的输入特性曲线上可以看出：

(1) 输入特性是非线性的，与晶体二极管正向伏安特性相似。

(2) 特性曲线上有段“死区”，锗管约  $0.15 \sim 0.2V$  左右，硅管为  $0.5V$  左右。

(3) 晶体二极管正常工作时基极电压很小，锗管为  $0.2 \sim 0.4V$  左右，硅管为  $0.6 \sim 0.8V$  左右。如果  $U_{be}$  过大， $I_b$  将急剧增加，会引起晶体管烧坏。

## 2. 输出特性曲线

晶体三极管的输出特性曲线是表示基极电流为某一定值时, 加在晶体管集电极与发射极之间的电压  $U_{ce}$  和它所产生的集电极电流  $I_c$  之间的关系曲线。

在图1-16中, 先调节  $R_{W1}$ , 使输入电流  $I_b$  为一定数值, 并保持不变。然后改变  $R_{W2}$ , 就可以得到一系列输出电压  $U_{ce}$  与输出电流  $I_c$  相对应的数据, 然后再将  $I_b$  分别定在不同值上, 用同样方法就得到一组输出特性曲线, 如图1-18所示。

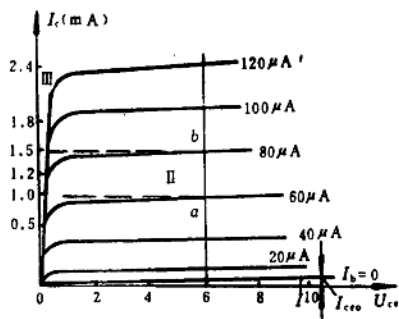


图 1-18 输出特性曲线

这组特性曲线能反映出  $I_b$ 、 $I_c$  和  $U_{ce}$  三者之间的关系。这样晶体管的四个参数  $I_b$ 、 $I_c$ 、 $U_{be}$ 、 $U_{ce}$  之间的关系就可以用两种特性曲线 (即输入特性曲线和输出特性曲线) 表达出来。

从图1-18的输出特性曲线中可以看出:

(1) 当  $U_{ce}$  一定时, 输入电流  $I_b$  的微小变化就能引起  $I_c$  的较大变化。如图中当  $U_{ce} = 6V$  时,  $I_b$  由  $60\mu A$  变化到  $80\mu A$  时,  $I_c$  则由  $1.0mA$  变到  $1.5mA$  (曲线上的  $a$  点变到  $b$  点), 即

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{(1.5 - 1.0) \times 1000}{(80 - 60)} = 25$$

即曲线平行线间的间距变化反映了电流放大系数  $\beta$  的大小。但由于晶体管是非线性元件, 曲线间距并不完全相等, 所以晶体管工作在不同的  $I_c$  值时  $\beta$  值也不同。一般来说, 特性曲线中间区域的间距较均匀, 这个区域的  $\beta$  值是可以近似认为是常数。

(2) 在  $U_{ce}$  超过一个不大电压之后 (通常是  $1V$  左右), 曲线就变得比较平坦。它表明集电极电压对集电极电流几乎没有什么影响。原因是从发射区注入到基区的载流子绝大部分都注入到集电区形成了集电极电流, 此时再增加  $U_{ce}$ ,  $I_c$  不会继续增大。欲增加  $I_c$  只有增加  $I_b$ 。

(3)  $I_b = 0$  时,  $I_c$  并不等于零, 这时的电流称为穿透电流  $I_{ceo}$ 。

(4) 曲线可以分为三个区域

A. 截止区:  $I_b = 0$  时的曲线以下的区域称为截止区。这时晶体管发射结和集电结均受反偏, 晶体管承受电压较高, 但电流很小, 工作在此区域的晶体管无电流放大作用。

工作在截止区时的晶体管各电极电位关系 (NPN管为例) 为  $U_c > U_b$ 、 $U_c > U_e$ 。

B. 饱和区: 特性曲线左侧靠近纵轴  $I_c$  近似直线上升部分, 此区域内集电极电压很小, 但  $I_c$  随  $U_{ce}$  增大而迅速增大。此区特点是发射结和集电结均受正偏, 工作在此区域的晶体管无放大作用。

工作在饱和区时的晶体管各电极电位关系为 (NPN管)  $U_b > U_c$ 、 $U_b > U_e$ 。

C. 放大区: 介于截止区与饱和区之间的区域。晶体管作为放大器时就工作在这个区域。这时晶体管发射结处于正偏, 集电结处于反偏。

工作在放大区域的晶体管各电极电位关系为 (NPN管)  $U_c > U_b > U_e$ 。

由于制造工艺上的原因, 同一型号的晶体管其特性差异很大, 特性曲线也会有较大差

别, 手册中绘出的特性曲线都是典型的曲线。

#### 四、晶体三极管的主要参数

晶体三极管的参数很多, 这里仅介绍一些主要参数, 供选用晶体三极管时参考。

##### 1. 电流放大系数

(1) 共发射极直流放大系数 $h_{FE}$ 。在共发射极电路中, 当 $U_{ce}$ 和 $I_b$ 为规定值时, 集电极电流 $I_c$ 与基极电流 $I_b$ 的比值, 叫直流放大系数, 用 $h_{FE}$ 表示。

$$\text{即} \quad h_{FE} = \frac{I_c}{I_b} \quad (1-3)$$

$h_{FE}$ 简称直流 $\beta$  (记作 $\bar{\beta}$ ), 是晶体管直流参数之一。 $h_{FE}$ 一般为20~200之间。

(2) 共发射极交流电流放大系数 $h_{fe}$ 。共发射极交流电流放大系数用 $\beta$ 表示。在手册中记作 $h_{fe}$ , 也记作 $h_{21e}$ 。

$\beta$ 表示在一定外加电压 $U_{ce}$ 下, 集电极电流变化量 $\Delta I_c$ 与基极电流变化量 $\Delta I_b$ 的比值。即

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \right|_{U_{ce} = \text{常数}} \quad (1-4)$$

$\beta$ 值可以用专门仪器测量出来, 也可用输出特性曲线求出。

(3) 共基极电路的电流放大系数 $\alpha$ 。共基极电流放大系数是指在一定外加电压 $U_{ce}$ 下, 集电极电流变化量 $\Delta I_c$ 与发射极电流变化量 $\Delta I_e$ 之比, 用 $\alpha$ 表示。即

$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \right|_{U_{ce} = \text{常数}} \quad (1-5)$$

由于集电极电流小于发射极电流, 所以 $\alpha$ 是小于1的。

$\alpha$ 与 $\beta$ 之间关系为

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (1-6)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1-7)$$

$\alpha$ 值一般在0.9~0.99之间, 对应的 $\beta$ 值为9~99。

##### 2. 极间反向电流

(1) 反向饱和电流 $I_{cbo}$ 。是指在发射极开路时集电极-基极反向截止电流。这就是集电极反向电压作用下由少数载流子所形成的电流 (如图1-19) 所示。

$I_{cbo}$ 一般很小, 在室温下, 高频小功率硅管为 $1\mu\text{A}$ 、锗管 $10\mu\text{A}$ 。低频小功率锗管为 $20\mu\text{A}$ 、硅管为 $1\mu\text{A}$ 以下。

(2) 穿透电流 $I_{ceo}$ 。是指在基极开路时集电极-发射极之间的反向电流, 如图1-20所示。

当基极开路,  $E_c$ 加到 $c$ 、 $e$ 之间时, 发射结处于正偏, 集电结处于反偏。集电结在反向电压作用下, 集电区少数载流子移向基区, 必然要与发射区扩散到基区的一部分电子相复合。而大部分电子可以到达集电区, 如图1-21所示。

由晶体管特性可知, 电子到达集电区的数量应等于在基区复合掉的 $\beta$ 倍。在基区复合掉的数量为 $I_{cbo}$ , 故到达集电区的数量为 $\beta I_{cbo}$ , 所以总电流为:

$$I_{ceo} = I_{cbo} + \beta I_{cbo} = (1 + \beta) I_{cbo} \quad (1-8)$$