



高职高专“十二五”规划教材

安徽省级规划教材

# 电子技术

DIANZI JISHU

曹文霞 主 编  
方俊芳 侯秀丽 段朝伟 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



高职高专“十二五”规划教材

安徽省省级规划教材

# 电子技术

DIANZI JISHU

主 编 曹文霞

副主编 方俊芳

编 写 刘 刚

主 审 汪永华

侯秀丽

王 琦

王维娜

吕之伦

段朝伟

钱多德

肖满云

钱德猛



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为高职高专“十二五”规划教材。

本书重点讲述了模拟电子技术和数字电子技术的基本理论,介绍了半导体器件的基础知识、放大电路、常用的组合逻辑电路和时序逻辑电路的应用等,并根据相关知识点给出了必要的例题和习题,图文并茂,通俗易懂。

本书是高职高专院校机电类和自动化等相近专业的教材,也可作为电气等相关专业人员的课外读物。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子技术/曹文霞主编. —北京:中国电力出版社,2014.1

高职高专“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-4927-8

I. ①电… II. ①曹… III. ①电子技术-高等职业教育-教材 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第222749号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2014年1月第一版 2014年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18印张 436千字

定价33.00元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



# 前言

21 世纪,人们进入到以微电子技术为代表和以因特网为标志的信息社会。近至计算机、手机、数码相机等生活常用品,远至工业、航天、军事等领域都可看到电子技术的身影,生产实践和科学技术领域都存在着大量与电子技术有关的问题。

电子技术由模拟电子技术和数字电子技术两部分构成。模拟电子技术是整个电子技术的基础,在信号放大、功率放大、整流稳压、模拟量反馈等领域具有重要的作用。与模拟电路相比,数字电路具有精度高、稳定性好、抗干扰能力强等优点。随着晶体管、集成电路的发明和时序逻辑电路的大量应用,电子技术在各大应用领域都得到了长足的发展,产品更是日新月异。

本书被评为 2013 年度安徽省规划教材。本书在编写的时候,考虑到高等职业教育的培养目标和电子技术课程教学的需求,对教学内容进行了仔细编排,重点讲述了基本理论,并根据相关知识点给出了必要的例题,以加深学生的理解。同时密切联系实际,介绍了晶体管的极性判别和命名、集成电路的识别和检测、常用的组合逻辑电路和时序逻辑电路的应用等,将理论和实践结合起来,为今后的专业学习和职业技能培训打下基础。

本书由安徽水利水电职业技术学院曹文霞任主编;安徽水利水电职业技术学院方俊芳、安徽商贸职业技术学院侯秀丽和河南机电高等专科学校段朝伟任副主编;河南机电高等专科学校刘刚、王琦,安徽江淮汽车股份有限公司钱多德、钱德猛,安徽水利水电职业技术学院段伟、王维娜和无锡惠山中等专业学校肖满云,参与了本书的编写。其中,曹文霞编写了第 5 章和第 8 章,方俊芳编写了第 1 章和第 2 章,侯秀丽编写了第 9 章和第 10 章,段朝伟编写了第 3 章和第 4 章,刘刚编写了第 7 章,王琦编写了第 11 章,钱多德编写了第 6 章,钱德猛、段伟、王维娜和肖满云编写了部分章节的公式、例题和课后习题。本书由安徽水利水电职业技术学院汪永华、吕之伦主审,对本书提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺陷和疏漏,恳请读者给予批评和指正。

编 者

# 目 录

## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 半导体器件基础知识 .....       | 1  |
| 1.1 半导体 .....               | 1  |
| 1.2 二极管 .....               | 4  |
| 1.3 三极管 .....               | 6  |
| 1.4 特殊半导体管 .....            | 11 |
| 1.5 晶体管的极性判别和命名法 .....      | 13 |
| 小结 .....                    | 15 |
| 练习题一 .....                  | 16 |
| 第 2 章 放大电路基础 .....          | 20 |
| 2.1 共射极放大电路分析 .....         | 20 |
| 2.2 共集放大电路和共基放大电路 .....     | 29 |
| 2.3 多级放大电路 .....            | 31 |
| 2.4 差分放大电路 .....            | 34 |
| 小结 .....                    | 35 |
| 练习题二 .....                  | 36 |
| 第 3 章 场效应管和功率放大电路 .....     | 42 |
| 3.1 场效应管放大电路 .....          | 42 |
| 3.2 功率放大电路 .....            | 53 |
| 小结 .....                    | 66 |
| 练习题三 .....                  | 67 |
| 第 4 章 反馈放大电路 .....          | 71 |
| 4.1 反馈的基本概念和判断方法 .....      | 71 |
| 4.2 负反馈放大电路的四种类型 .....      | 73 |
| 4.3 负反馈对放大电路性能的作用 .....     | 76 |
| 小结 .....                    | 77 |
| 练习题四 .....                  | 78 |
| 第 5 章 集成运算放大器基础 .....       | 82 |
| 5.1 集成电路的简介 .....           | 82 |
| 5.2 集成运算放大器概述 .....         | 85 |
| 5.3 集成运算放大器在信号运算方面的应用 ..... | 87 |
| 5.4 集成运算放大器在信号处理方面的应用 ..... | 92 |
| 5.5 集成运算放大器的信号产生电路 .....    | 95 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 5.6 集成电路的识别与检测 .....          | 105 |
| 小结 .....                      | 107 |
| 练习题五 .....                    | 108 |
| <b>第6章 直流稳压电源</b> .....       | 112 |
| 6.1 直流稳压电源的组成及各部分作用 .....     | 112 |
| 6.2 整流电路 .....                | 113 |
| 6.3 滤波电路 .....                | 118 |
| 6.4 稳压电路 .....                | 120 |
| 小结 .....                      | 129 |
| 练习题六 .....                    | 129 |
| <b>第7章 逻辑代数基础和基本门电路</b> ..... | 132 |
| 7.1 逻辑代数基础 .....              | 132 |
| 7.2 简单门电路及其组合 .....           | 135 |
| 7.3 逻辑代数 .....                | 139 |
| 7.4 TTL 门电路 .....             | 147 |
| 7.5 CMOS 门电路 .....            | 152 |
| 小结 .....                      | 154 |
| 练习题七 .....                    | 155 |
| <b>第8章 组合逻辑电路</b> .....       | 157 |
| 8.1 组合逻辑电路的分析与设计 .....        | 157 |
| 8.2 常用组合逻辑电路 .....            | 161 |
| 8.3 组合逻辑电路中的竞争—冒险现象 .....     | 178 |
| 小结 .....                      | 181 |
| 练习题八 .....                    | 182 |
| <b>第9章 触发器电路</b> .....        | 185 |
| 9.1 基本 RS 触发器 .....           | 185 |
| 9.2 同步触发器 .....               | 188 |
| 9.3 主从触发器 .....               | 193 |
| 9.4 边沿触发器 .....               | 199 |
| 9.5 不同类型时钟触发器间的转换 .....       | 201 |
| 小结 .....                      | 203 |
| 练习题九 .....                    | 204 |
| <b>第10章 时序逻辑电路</b> .....      | 206 |
| 10.1 时序逻辑电路的基本概念 .....        | 206 |
| 10.2 时序逻辑电路的分析 .....          | 207 |
| 10.3 时序逻辑电路的设计 .....          | 212 |
| 10.4 常用时序逻辑电路 .....           | 217 |
| 10.5 脉冲波形的产生与变换 .....         | 240 |
| 小结 .....                      | 256 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 练习题十.....                  | 256 |
| 第 11 章  模拟量和数字量的相互转换 ..... | 259 |
| 11.1  D/A 转换器 .....        | 259 |
| 11.2  A/D 转换器 .....        | 266 |
| 小结.....                    | 276 |
| 练习题十一.....                 | 277 |
| 参考文献.....                  | 279 |

## 第1章 半导体器件基础知识

### 1.1 半 导 体

材料通常根据导电能力（电阻率）的不同分为三类：第一类是导体，特别容易导电，如金属类有银、铜、铝等；电解液类有 NaCl 水溶液、普通水等。第二类基本不导电，称为绝缘体，如橡胶、玻璃等。第三类导电性能介于导体与绝缘体之间的材料，称为半导体。在电子器件中，常用的半导体材料有：元素半导体，如硅（Si）、锗（Ge）等；化合物半导体，如砷化镓（GaAs）等；掺杂或制成其他化合物半导体材料，如硼（B）、磷（P）、铟（In）和锑（Sb）等。其中硅是最常用的一种半导体材料。

#### 1.1.1 本征半导体

完全不含杂质且无晶格缺陷的纯净半导体称为本征半导体。硅和锗都是四价元素，其原子核最外层有四个价电子。它们都是由同一种原子构成的“单晶体”，属于本征半导体。

图 1-1 为半导体材料硅和锗的原子结构简化模型及其晶体结构。硅和锗都是四价元素，在其最外层原子轨道上具有四个电子，称为价电子。由于原子呈中性，故在图中原子核用带圆圈的+4 符号表示。半导体的原子是规则排列的，邻近原子之间由共价键联结，其晶体结构示意图如图 1-1 所示。

在室温下，本征半导体共价键中的价电子获得足够的能量，挣脱共价键的束缚进入导带，成为自由电子，原来的共价键位置出现空穴，在晶体中产生电子—空穴对，这种现象称为本征激发，如图 1-2 所示。

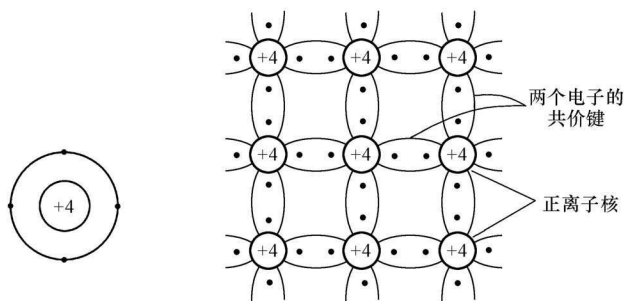


图 1-1 硅和锗的原子结构简化模型及晶体结构

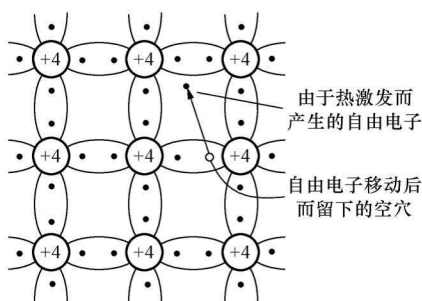


图 1-2 本征激发

由于共价键出现了空穴，在外加电场的作用下，邻近价电子就可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，以后其他电子又可转移到这个新的空位。这种能够移动的电子或空穴称为自由载流子。它们在外电场作用下产生定向运动而形成宏观电流，分别称为电子导电和空穴导电。这种由于电子—空穴对的产生而形成的混合型导电称为本征导电。导带中的电子也会落入空穴，使电子—空穴对消失，称为复合。

本征半导体中空穴的移动方向和电子移动的方向是相反的，自由电子和空穴数量相等。

### 1.1.2 N型半导体和P型半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素。本征半导体掺入杂质后称为杂质半导体，分为N型半导体和P型半导体。

#### 一、N型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量五价元素（称为杂质），如磷或砷等，可使自由电子的浓度大大增加，自由电子成为多数载流子（简称多子），空穴成为少数载流子（简称少子）。这种以电子导电为主的半导体称为N型半导体，如图1-3（a）所示。

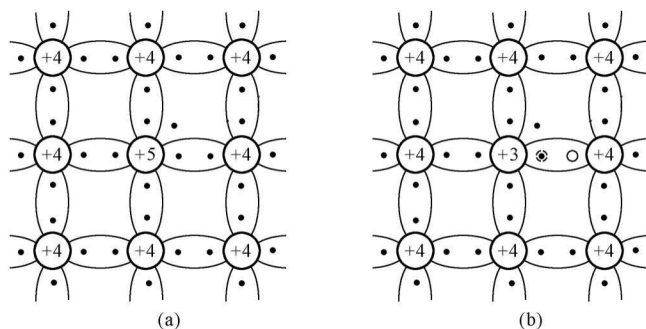


图1-3 N型半导体和P型半导体

(a) N型半导体；(b) P型半导体

#### 二、P型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量三价元素杂质，如硼或铟等，则空穴浓度大大增加，空穴成为多子，而电子成为少子。这种以空穴为主的半导体称为P型半导体，如图1-3（b）所示。

### 1.1.3 PN结的形成及其特性

#### 一、PN结的形成

若在一种类型杂质半导体的基片上，用特定的掺杂工艺加入另一种类型杂质元素，这样在所形成的P型半导体和N型半导体的交界两侧，由于N区内电子很多而空穴很少，而P区内空穴很多电子很少，由于扩散作用，在它们的交界处电子和空穴就会从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。于是，有一些电子要从N区向P区扩散，也有一些空穴要从P区向N区扩散。它们扩散的结果就使P区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子，N区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子。半导体中的离子不能任意移动，因此不参与导电。这些不能移动的带电粒子在P和N区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，就是所谓的PN结，如图1-4所示。扩散越强，空间电荷区越宽。在空间电荷区，由于缺少多子（多数载流子），所以也称耗尽层。出现了空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区就形成了一个内电场，其方向是从带正电的N区指向带负电的P区。显然，这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反，它是阻止扩散的。另一方面，这个电场将使N区的少数载流子空穴向P区漂移，使P区的少数载流子电子向N区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从N区漂移到P区的空穴补充了原来交界面上P区所失去的空穴，从P区漂移到N区的电子补充了原来交界面上N区所失去的电子，这就使空间电荷

减少, 因此, 漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。当漂移运动达到和扩散运动相等时, PN 结便处于动态平衡状态。

## 二、PN 结的特性

### (一) PN 结的单向导电性

#### 1. PN 结加正向电压时

通常加在 PN 结上的电压称为偏置电压。若 PN 结外加正向电压 (P 区接电源的正极, N 区接负极, 或 P 区电位高于 N 区电位), 称为正向偏置 (简称正偏), 如图 1-5 所示。外加电压在 PN 结上形成电场, 其方向与内电场相反, 使空间电荷区变窄, 势垒降低使 P 区和 N 区中能越过这个势垒的多数载流子大大增加, 形成扩散电流。其方向由 P 区流向 N 区, 简称正向电流。在一定范围内, 外加电压越大正向电流也越大, PN 结呈低阻导通状态, 相当于开关闭合。

#### 2. PN 结加反向电压时

若 PN 结加反向电压, P 区接电源负极, N 区接电源正极, 称为反向偏置 (简称反偏), 如图 1-6 所示。这时外电场的方向与内电场方向相同, 使空间电荷区变

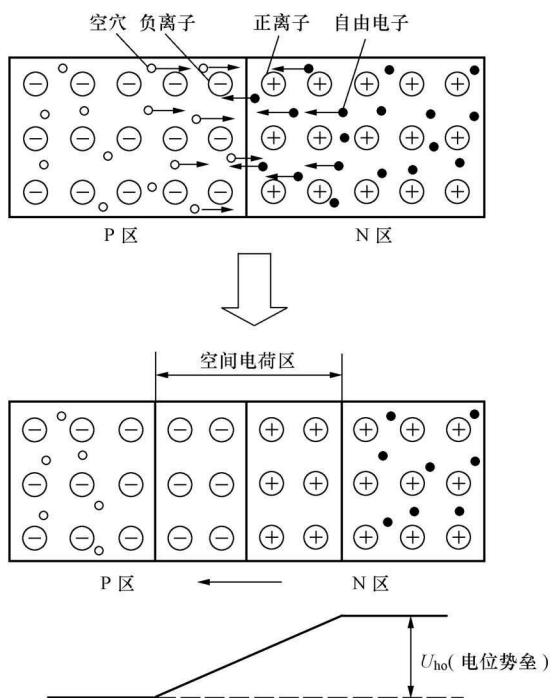


图 1-4 PN 结的形成过程

宽, 势垒增加使多子的扩散运动难以进行, 此时流过 PN 结的电流主要由少子的漂移运动形成, 其方向由 N 区流向 P 区, 称为反向电流, 当温度不变时, 少数载流子的浓度不变, 因此反向电流几乎不随外加电压而变化, 故又称为反向饱和电流。在常温下, 少数载流子的浓度很低, 所以反向电流很小, 一般可以忽略, PN 结呈高阻截止状态, 相当于开关断开。

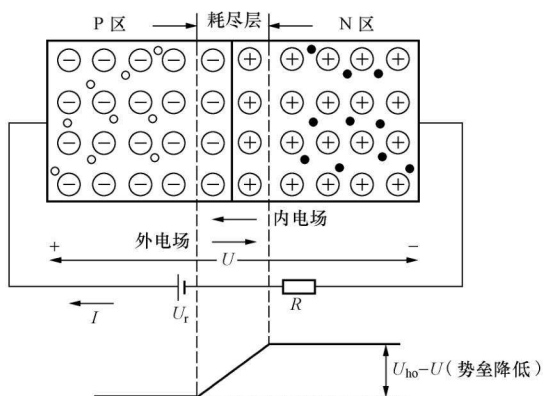


图 1-5 PN 结加正向电压

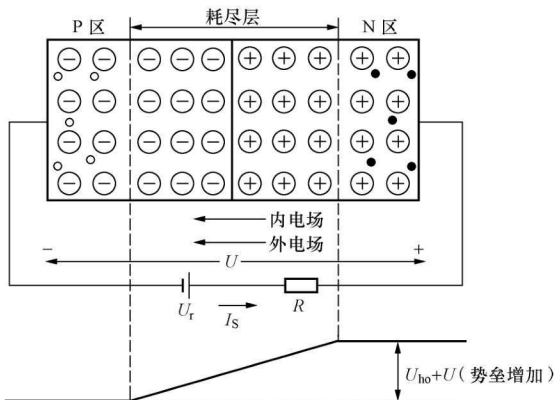


图 1-6 PN 结加反向电压

由此可以得出结论: PN 结正偏时呈导通状态, 正向电阻很小, 正向电流很大; PN 结反偏时呈截止状态, 反向电阻很大, 反向电流很小。PN 结具有单向导电性。需要指出的是当反

向电流超过一定数值后,反向电流将急剧增加,发生反向击穿现象,单向导电性被破坏。

## (二) PN 结伏安特性表达式

PN 结的电压与电流关系满足:

$$i_D = I_S(e^{U_D/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中  $I_S$ ——反向饱和电流;

$U_T$ ——温度的电压当量,在常温 ( $T=300\text{K}$ ) 下,  $U_T = \frac{kT}{q} = 26\text{mV}$ 。

PN 结的伏安特性如图 1-7 所示。

## (三) PN 结的反向击穿

当 PN 结的反向电压增加到一定数值时,反向电流突然快速增加,此现象称为 PN 结的反向击穿,如图 1-8 所示。反向击穿分为热击穿和电击穿。

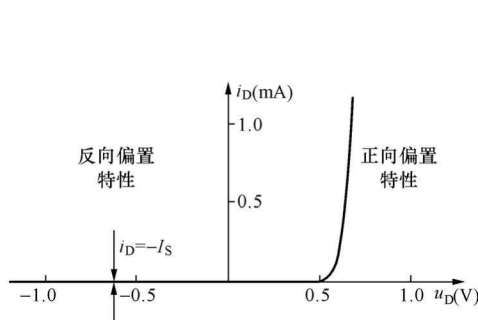


图 1-7 PN 结的伏安特性

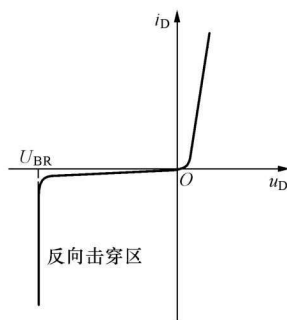


图 1-8 PN 结的反向击穿

(1) PN 结热击穿后电流很大,电压又很高,消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结发热,把 PN 结烧毁。

(2) PN 结电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿。当 PN 结反向电压增加时,空间电荷区中的电场随之增强。这样,通过空间电荷区的电子和空穴,就会在电场作用下获得大量能量,在晶体中运动的电子和空穴将不断地与晶体原子发生碰撞,当电子和空穴的能量足够大时,通过这样的碰撞可使共价键中的电子激发形成自由电子—空穴对。新产生的电子和空穴也向相反的方向运动,重新获得能量,又可通过碰撞,再产生电子—空穴对,这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后,载流子的倍增情况就像在陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样,载流子增加得多而快,这样,反向电流剧增,PN 结就发生雪崩击穿。在加有较高的反向电压下,PN 结空间电荷区中存在一个强电场,它能够破坏共价键,将束缚电子分离出来造成电子—空穴对,形成较大的反向电流。发生齐纳击穿需要的电场强度约为  $2 \times 10^5 \text{V/cm}$ ,这只有在杂质浓度特别大的 PN 结中才能达到,因为杂质浓度大,空间电荷区内电荷密度(即杂质离子)也大,因而空间电荷区很窄,电场强度可能很高。

电击穿可被利用(如稳压管),而热击穿须尽量避免。

## 1.2 二 极 管

### 1.2.1 二极管的基本结构

在 PN 结上加上引线和封装,就成为一个二极管。二极管按结构分为点接触型、面接触

型和平面型三大类。

(1) 点接触型二极管：PN 结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路，如图 1-9 所示。

(2) 面接触型二极管：PN 结面积大，用于工频大电流整流电路，如图 1-10 所示。

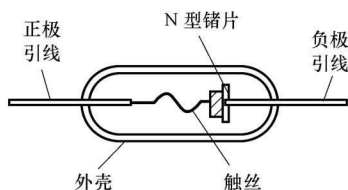


图 1-9 点接触型二极管

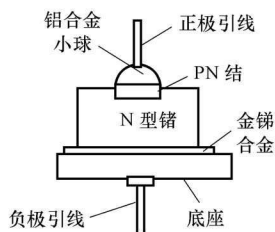


图 1-10 面接触型二极管

(3) 平面型二极管：往往用于集成电路制造工艺中。PN 结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中，如图 1-11 所示。

(4) 二极管的代表符号如图 1-12 所示。

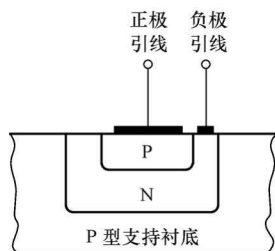


图 1-11 平面型二极管

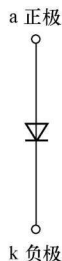


图 1-12 二极管代表符号

### 1.2.2 二极管的伏安特性

(1) 正向特性：正向特性表现为图 1-13 中的①段。当正向电压较小时，正向电流几乎为零，此工作区域称为死区。 $U_{th}$  称为门槛电压或死区电压（该电压硅管约为 0.5V，锗管为 0.2V）。当正向电压大于  $U_{th}$  时，内电场削弱，电流因而迅速增长，呈现出很小的正向电阻。

(2) 反向特性：反向特性表现为图 1-13 中的②段。由于是少数载流子形成反向饱和电流，所以其数值很小，当温度升高时，反向电流将随之急剧增加。

(3) 反向击穿特性：反向击穿特性对应于图 1-13 中的③段。当反向电压增加到一定大小时，反向电流剧增，二极管反向击穿。其原因和 PN 击穿相同。

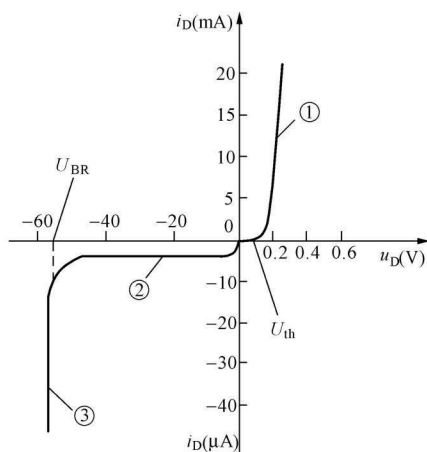


图 1-13 二极管的伏安特性图

### 1.2.3 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流  $I_F$ ：是指二极管长期使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。使用时通过二极管的平均电流要小于该电流，否则，电流过大，将因 PN 结过热而烧坏二极

管。例如 2AP1 最大整流电流为 16mA。

(2) 最大反向工作电压  $U_{RM}$  和反向击穿电压  $U_{BR}$ ：为保证二极管安全使用所允许施加的最大反向电压称为二极管的最高反向工作电压。一般规定最高反向工作电压为反向击穿电压的一半或三分之一。

(3) 最高反向电流  $I_R$ ：二极管加最高反向工作电压时流过的电流为其最高反向电流。反向电流越大，说明二极管的单向导电性越差，且受温度影响越大；反之，则单向导电性越好。

(4) 极间电容  $C_j$ ：二极管的极间电容包括势垒电容和扩散电容，在高频运用时必须考虑 PN 结电容的影响。二极管不同的工作状态，其极间电容产生的影响效果也不同。

二极管的参数是正确使用二极管的依据，一般半导体器件手册中都给出不同型号管子参数。使用时，应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压，否则将容易损坏管子。

## 1.3 三 极 管

### 1.3.1 三极管的结构简介

三极管又称晶体三极管，它是通过一定的制作工艺，将两个 PN 结结合在一起的器件，三极管可以用来放大微弱的信号和作为无触点开关。

三极管的种类很多，按结构不同可分为 NPN 型和 PNP 型。无论是 NPN 型还是 PNP 型都分为发射区、基区和集电区，如图 1-14 所示，由三个区各引出一个电极，分别称为发射极 (E)、基极 (B) 和集电极 (C)，发射区和基区之间的 PN 结称为发射结，集电区和基区之间的 PN 结称为集电结。

在电路中，三极管用字符 VT 表示，两类三极管的电路符号如图 1-15 所示，其中发射极箭头所示方向表示发射极电流的流向。

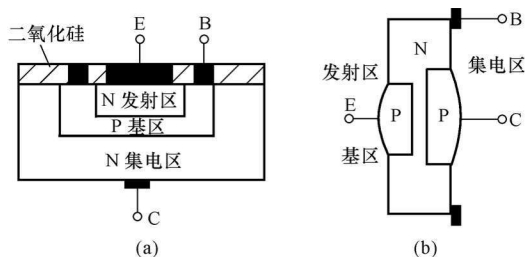


图 1-14 三极管的结构

(a) 硅平面型管 (NPN); (b) 锗合金型管 (PNP)

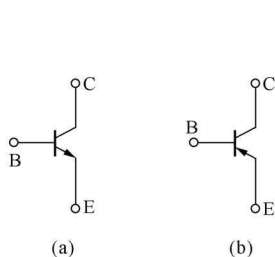


图 1-15 两类三极管的电路符号

(a) NPN 型; (b) PNP 型

### 1.3.2 电流放大和分配原理

#### 一、三极管的电流放大工作原理

如果三极管的三个区不做特殊处理，从表面看，三极管并不能起到放大作用。要想实现放大，必须从三极管内部结构和外部所加电源的极性来保证。

(1) 三极管内部结构要求：①发射区高掺杂；②基区做得很薄，通常只有几微米到几十微米，而且掺杂较少；③集电结面积大。

(2) 三极管放大的外部条件：①发射结必须加正向电压（正偏）；②集电结必须加反向电压（反偏）。

(3) 三极管的工作原理。

下面分析这种结构晶体管中的载流子运动规律，如图 1-16 所示。

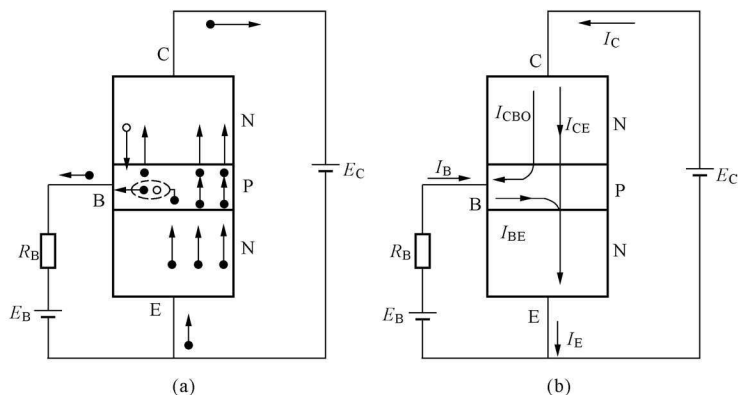


图 1-16 晶体管中的载流子运动规律

(a) 载流子运动；(b) 电流分配

1) 发射区向基区扩散电子。对于 NPN 型管，因为发射区自由电子（多子）浓度高，而基区自由电子（少子）少，所以自由电子要从发射区向基区扩散。由于发射结正偏，发射区自由电子扩散运动加强，不断扩散到基区，并不断从电源补充进电子，形成发射极电流  $I_E$ 。基区的多子（空穴）也要向发射区扩散，但由于基区的空穴浓度比发射区自由电子的浓度小得多，因此空穴形成的电流很小，可以忽略不计（图中未画出）。

2) 电子在基区扩散和复合。从发射区扩散到基区的自由电子起初都聚集在发射结附近，靠近集电结的自由电子很少，自由电子将向集电结方向继续扩散。在此过程中，少数自由电子（1%~10%）会与空穴（基区中的多子）复合，由于基区接电源正极，被复合掉的基区空穴由基极电源  $E_B$  重新补给，形成电流  $I_{BE}$ ，基本上等于基极电流。

3) 集电区收集从发射区扩散过来的自由电子。由于集电结反偏，它阻挡集电区的自由电子向基区扩散，但可将从发射区扩散到基区并处于集电区边缘的自由电子拉入集电区，从而形成电流  $I_{CE}$ ，它基本上等于集电极电流  $I_C$ 。

集电结的反偏还会使集电区的空穴（集电区少子）向基区运动，基区的电子（基区少子）向集电区运动，形成电流  $I_{CBO}$ ，这个电流数值很小。

## 二、三极管的电流分配

下面通过实验检测三极管的电流放大效果。如图 1-17 所示， $E_B$  为基极电源，与基极电阻  $R_B$  及三极管的基极 B、发射极 E 组成基极—发射极回路（称作输入回路）， $E_B$  使发射结正偏， $E_C$  为集电极电源，与集电极电阻  $R_C$  及三极管的集电极 C、发射极 E 组成集电极—发射极回路（称作输出回路）， $E_C$  使集电结

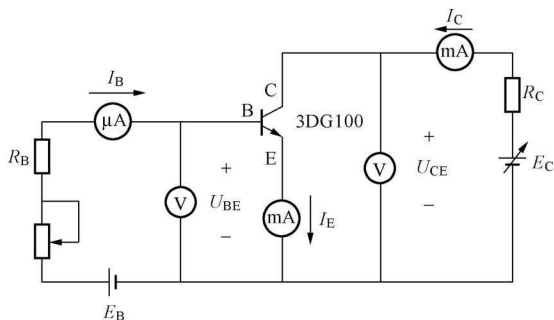


图 1-17 共发射极放大实验电路

反偏。图中，发射极 E 是输入输出回路的公共端，因此称这种接法为共发射极放大电路，改变可变电阻  $R_B$ ，测基极电流  $I_B$ 、集电极电流  $I_C$  和发射极电流  $I_E$ ，结果见表 1-1。

表 1-1 三极管电流测试数据

|                   |       |       |      |      |      |      |
|-------------------|-------|-------|------|------|------|------|
| $I_B$ ( $\mu A$ ) | 0     | 20    | 40   | 60   | 80   | 100  |
| $I_C$ (mA)        | 0.005 | 0.99  | 2.08 | 3.17 | 4.26 | 5.40 |
| $I_E$ (mA)        | 0.005 | 10.01 | 2.12 | 3.23 | 4.34 | 5.50 |

从实验结果可得如下结论：

(1)  $I_E = I_B + I_C$ 。此关系就是三极管的电流分配关系，它符合基尔霍夫电流定律。

(2)  $I_E$  和  $I_C$  几乎相等，但远远大于基极电流  $I_B$ ，从第三列和第四列的实验数据可知  $I_C$  与  $I_B$  的比值分别为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.08}{0.04} = 52, \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3.17}{0.06} = 52.8$$

$I_B$  的微小变化会引起  $I_C$  较大的变化，计算可得：

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C4} - I_{C3}}{I_{B4} - I_{B3}} = \frac{3.17 - 2.08}{0.06 - 0.04} = \frac{1.09}{0.02} = 54.5$$

计算结果表明，微小的基极电流变化，可以控制比之大数十倍至数百倍的集电极电流的变化，这就是三极管的电流放大作用。 $\bar{\beta}$ 、 $\beta$  称为电流放大系数。

### 1.3.3 输入和输出特性曲线

三极管的特性曲线是用来表示各个电极间电压和电流之间的相互关系的，它反映出三极管的性能，是分析放大电路的重要依据。特性曲线可由实验测得，也可在三极管图示仪上直观地显示出来。

#### 一、输入特性曲线

三极管的输入特性曲线表示了当集电极—发射极电压  $U_{CE}$  为常量时， $I_B$  和  $U_{BE}$  的关系（见图 1-18）。

由图可见，输入特性有以下几个特点：

(1) 输入特性也有一个“死区”。在“死区”内， $U_{BE}$  虽已大于零，但  $I_B$  几乎仍为零。当  $U_{BE}$  大于某一值后， $I_B$  才随  $U_{BE}$  增加而明显增大。和二极管一样，硅三极管的死区电压（或称为门槛电压）约为 0.5V，发射结导通电压（0.6~0.7）V；锗三极管的死区电压约为 0.2V，导通电压为（0.2~0.3）V。若为 PNP 型三极管，则发射结导通电压  $U_{BE}$  分别为硅管（-0.6~-0.7）V 和锗管（-0.2~-0.3）V。

(2) 一般情况下，当  $U_{CE} > 1V$  以后，输入特性几乎与  $U_{CE} = 1V$  时的特性重合，因为  $U_{CE} > 1V$  后， $I_B$  无明显改变了。三极管工作在放大状态时， $U_{CE}$  总是大于 1V 的（集电结反偏），因此常用  $U_{CE} \geq 1V$  的一条曲线来代表所有输入特性曲线。

#### 二、输出特性曲线

三极管的输出特性曲线表示以  $I_B$  为常量时， $I_C$  和  $U_{CE}$  的关系曲线。在不同的  $I_B$  下，可得到一组不同的输出曲线，这就是三极管的输出特性曲线，如图 1-19 所示。

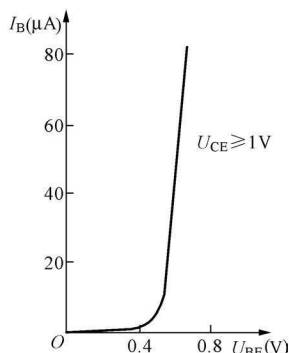


图 1-18 晶体管的输入特性曲线

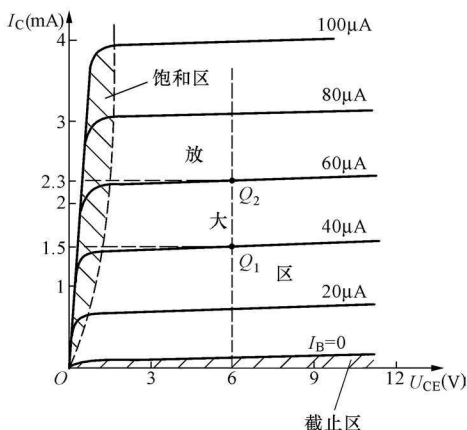


图 1-19 三极管的输出特性曲线

由图可见, 输出特性曲线可分放大、截止和饱和三个区域。

(1) 截止区:  $I_B = 0$  的特性曲线以下区域称为截止区。在这个区域中, 集电结处于反偏,  $U_{BE} \leq 0$  发射结反偏, 电流  $I_C \approx 0$ 。工作在截止区时, 三极管在电路中犹如一个断开的开关。

(2) 饱和区: 特性曲线靠近纵轴的区域是饱和区。当  $U_{CE} < U_{BE}$  时, 发射结、集电结均处于正偏。在饱和区  $I_B$  的变化与  $I_C$  的变化不成正比关系, 三极管失去放大作用。工作在饱和区时,  $U_{CE} \approx 0$ , 三极管在电路中犹如一个闭合的开关。

(3) 放大区: 特性曲线近似水平直线的区域为放大区。其特点是  $I_C$  的大小受  $I_B$  的控制,  $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ , 放大区也称线性区。如前所述, 在此区域, 发射结正偏, 集电结反偏。特性曲线反映出恒流源的特点, 即三极管可看作受基极电流控制的受控恒流源。

### 1.3.4 三极管的主要参数

三极管的参数是用来表示三极管的各种性能的指标, 是评价三极管的优劣和选用三极管的依据, 也是计算和调整三极管电路时必不可少的根据。主要参数有以下几个。

#### 一、电流放大系数

(1) 共射直流电流放大系数  $\bar{\beta}$ 。它表示集电极电压一定时, 集电极电流和基极电流之间的关系。即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

(2) 共射交流电流放大系数  $\beta$ 。它表示在  $U_{CE}$  保持不变的条件下, 集电极电流的变化量与相应的基极电流变化量之比, 即

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

上述两个电流放大系数  $\bar{\beta}$  和  $\beta$  的含义虽不同, 但工作于输出特性曲线的放大区域的平坦部分时, 两者差异极小, 故在今后估算时常认为  $\bar{\beta} = \beta$ 。

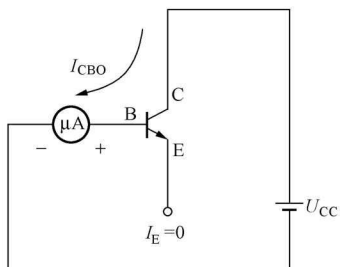
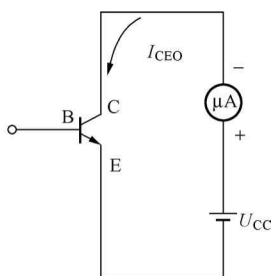
由于制造工艺上的分散性, 同一类型三极管的  $\beta$  值差异很大。常用的小功率三极管,  $\beta$  值一般为 20~200。 $\beta$  过小, 管子电流放大作用小,  $\beta$  过大, 工作稳定性差。一般选用  $\beta$  在 40~100 之间的管子较为合适。

#### 二、极间电流

(1) 集电极—基极反向截止电流  $I_{CBO}$ 。 $I_{CBO}$  是指发射极开路, 集电极与基极之间加反向

电压时,集电区和基区的少数载流子向对方运动所产生的电流,可以用图 1-20 的电路测出。 $I_{CBO}$  是少数载流子电流,随温度升高而指数上升,影响三极管工作的稳定性。作为三极管的性能指标, $I_{CBO}$  越小越好,硅管的  $I_{CBO}$  比锗管的小得多,小功率锗管的  $I_{CBO}$  为几微安到几十微安,小功率硅管在  $1\mu\text{A}$  以下。

(2) 集电极—发射极反向截止电流  $I_{CEO}$ 。 $I_{CEO}$  是基极开路,集电结处于反向偏置,发射结处于正向偏置时的集电极电流,由于这个电流由集电极穿过基区流到发射极,故又称为穿透电流。 $I_{CEO}$  的测量如图 1-21 所示。硅管的穿透电流约为几微安,锗管的约为几十微安,其值越小越好。

图 1-20  $I_{CBO}$  的测量图 1-21  $I_{CEO}$  的测量

根据三极管的电流分配关系可知: $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。故  $I_{CEO}$  也要受温度影响而改变,且  $\beta$  大的三极管的温度稳定性较差。

### 三、极限参数

三极管的极限参数规定了使用时不许超过的限度。主要极限参数如下:

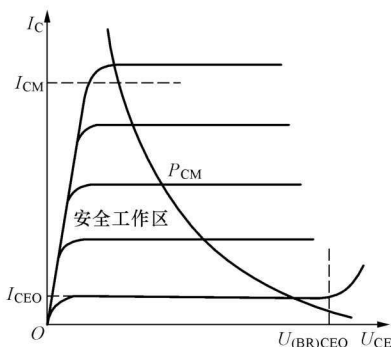


图 1-22 晶体管的安全工作区

(1) 集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ 。三极管电流  $I_C$  与电压  $U_{CE}$  的乘积称为集电极耗散功率,这个功率导致集电结发热,温度升高。而三极管的结温是有一定限度的,一般硅管的最高结温为  $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ,锗管的最高结温为  $70 \sim 100^\circ\text{C}$ ,超过这个限度,管子的性能就要变坏,甚至烧毁。因此,根据管子的允许结温定出了集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ 。在坐标系上画出  $P_{CM} = I_C U_{CE}$  的曲线,称为集电极最大功率损耗线,如图 1-22 所示。 $P_{CM}$  曲线的左下方均满足  $P_C < P_{CM}$  的条件为安全区,右上方为过损耗区。

(2) 反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$ 。反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$  是指基极开路时,加于集电极—发射极之间的最大允许电压。使用时如果超出这个电压将导致集电极电流  $I_C$  急剧增大,这种现象称为击穿。从而造成管子永久性损坏。一般取电源  $U_{CC} < U_{(BR)CEO}$ 。

(3) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 。集电极电流  $I_C$  超过一定值时,三极管的  $\beta$  就要显著下降。 $I_{CM}$  表示当  $\beta$  值下降到正常值三分之二时的集电极电流称为集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 。通常  $I_C$  不应超过  $I_{CM}$ 。

$P_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$  和  $I_{CM}$  这三个极限参数决定了三极管的安全工作区。图 1-22 根据 3DG4 管的三个极限参数: $P_{CM} = 300\text{mW}$ ,  $I_{CM} = 30\text{mA}$ ,  $U_{(BR)CEO} = 30\text{V}$ ,画出了它的安全工作区。