



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电工学 (第二版)

下册 电子技术

王 浩 主编

姚 伟 刘跃群 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电工学 (第二版)

下册 电子技术

主 编	王 浩	
副主编	姚 伟	刘跃群
编 写	朱继明	朱 琼
主 审	程隆贵	丁巧林



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

全书共分上、下两册。

《电工学》(第二版)上册电工技术共七章,主要包括电工基础、变压器、异步电动机、直流电动机、同步发电机、发电厂厂用电、低压电动机的控制、安全用电、常用电工仪表等。

《电工学》(第二版)下册电子技术共八章,主要包括常用的半导体器件、三极管交流放大电路、集成运算放大器、整流电源、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路及数模转换等。

本书为高职、高专院校非电类专业或相关专业的教材,亦可作为成人教育教材和相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工学.下册/王浩主编. —2版. —北京:中国电力出版社,2010

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 978-7-5123-0205-1

I. ①电… II. ①王… III. ①电工学—成人教育:高等教育—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第042226号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年1月第一版

2010年7月第二版 2010年7月北京第六次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11.25印张 216千字

定价 14.60元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，基本内容与框架与第一版相同。为了便于灵活选用，本书仍采用上、下册的分装方式。

在多次使用和广泛征求意见的基础上，编者对第一版主要作了如下修改：

(1) 对于第一版上册，将原附录中的复数知识融入正文中；增补了“三相异步电动机的使用与维护”一节内容。

(2) 对于第一版下册，简写了模拟电子技术各章内容；在“放大器的负反馈”一节中，增补了反馈类型的判断内容，以满足少数专业的特定需要；将原“数字电路基础”一章改编成四章，这样层次更显清楚。

(3) 新增了实验内容，以便选用。

(4) 把教材内容区分为“基本内容”和“机动内容”，以适应本课程总学时数少，不同专业学时数相差较大的实际情况。这样的区分是相对的，不同专业应根据实际需要进行内容的调整。

各章节打“*”号的为“机动内容”，打“△”号的为发电厂非电类专业应学内容。

本教材完成全部教学内容，上册约需 55~65 学时，下册约需 45~55 学时；完成全部基本教学内容，上册约需 45~55 学时，下册约需 35~45 学时。

第二版的编审人员及分工与第一版相同。

由于编者水平所限，书中不当和错误之处在所难免，再次恳请使用本书的老师 and 读者予以指正。

2010 年 3 月

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004～2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标，符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求，具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性，符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色，符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

为了适应非电类不同专业的灵活选用，本书分装成上、下两册。上册定名为《电工学》（上册）（电工技术），内容包括电工基础和电工技术应用；下册定名为《电工学》（下册）（电子技术），内容包括模拟电路和数字电路。

本书的主要特点：

（1）注意与原有知识的妥善衔接。本书是在高中、初中起点的五年制大专《物理》基础上编写的，注意与原有的电磁基本知识的妥善衔接，但不重复；

（2）精选基础部分的教学内容。对于基础部分（电工基础）的选材紧扣专业需要，以够用为度；

（3）拓宽电工技术应用的内容，加强数字电路部分。目的是为不同专业提供较大的选材空间，适应电子技术新的发展方向；

（4）章、节内容安排层次分明，条理清楚，概念阐述力求简明、准确，理论分析力求透彻，文字力求通俗易懂；

（5）突出实践性。从选材、内容的讲述，到例题、习题的配置，都力求理论联系实际。

完成本教材全部教学内容的学时，上册约需 65～70 课时，下册约需 45～50 课时。不同专业应根据所给学时及需要，确定选学内容。在教学过程中，应尽可能安排一定的实验、实训环节，以加强学生的实际技能。

本书由保定电力职业技术学院王浩老师主编，山西电力职业技术学院姚伟老师、长沙电力职业技术学院刘跃群老师担任副主编，保定电力职业技术学院朱继明老师、朱琼老师参编。姚伟编写上册第一、七章，刘跃群编写下册第一、二章，朱继明编写上册第三章，朱琼编写下册第五章，其余各章及附录由王浩编写。全书由武汉电力职业技术学院程隆贵老师、华北电力大学丁巧林老师主审。

由于编者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，恳请使用本书的老师和读者予以指正。

编者

2005年10月

目 录

前言

第一版前言

第一章 半导体二极管及三极管	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 半导体二极管	2
第三节 专用二极管	4
第四节 半导体三极管	5
本章小结	10
习题一	10
第二章 三极管交流放大电路	12
第一节 共射基本交流电压放大电路	12
第二节 放大电路的分析	15
第三节 静态工作点的稳定	17
第四节 多级放大器	19
第五节 放大器的负反馈	21
第六节 射极输出器	26
第七节 功率放大器	27
* 第八节 正弦波振荡器	30
* 第九节 场效应管及其放大电路简介	32
本章小结	34
习题二	35
第三章 集成运算放大器	39
第一节 差动放大电路	39
第二节 集成运算放大器	41
第三节 集成运算放大器的线性应用	43
第四节 集成运算放大器的非线性应用	47
本章小结	48
习题三	49
第四章 整流电源	52
第一节 二极管整流电路	52
第二节 滤波电路	55
第三节 稳压电路	57

* 第四节 晶闸管	59
* 第五节 可控整流主电路	61
* 第六节 晶闸管的触发电路	64
本章小结	66
习题四	67
第五章 数字电路基础	69
第一节 概述	69
第二节 数制和BCD码	69
第三节 基本逻辑门电路	72
第四节 集成逻辑门电路	75
第五节 逻辑代数与逻辑函数化简	79
本章小结	81
习题五	82
第六章 组合逻辑电路	83
第一节 组合逻辑电路的分析与设计	83
第二节 编码器	87
第三节 译码器与数字显示	88
本章小结	92
习题六	92
第七章 时序逻辑电路	94
第一节 触发器	94
第二节 寄存器和计数器	99
* 第三节 数字电路应用举例	102
本章小结	106
习题七	106
第八章 模/数转换器和数/模转换器	108
* 第一节 A/D 转换器	108
* 第二节 D/A 转换器	111
本章小结	113
习题八	113
实验	115
(下册) 附录	127
A 半导体器件型号命名和主要参数	127
B 集成器件型号命名和主要参数	132
C (下册) 部分习题参考答案	135
参考文献	137

半导体二极管及三极管

半导体器件是构成电子电路的基础元件，半导体二极管、三极管是最常用的半导体器件。构成半导体器件的物质基础是 PN 结。本章在介绍 PN 结的基础上，介绍普通半导体二极管、专用二极管，之后介绍半导体三极管。

第一节 半导体的基本知识

物质按导电能力的不同分为导体、绝缘体和半导体。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的特殊物质。

一、本征半导体

常用的半导体材料有硅和锗。它们都是四价元素，原子最外层有四个价电子。

纯净的半导体叫本征半导体。本征半导体受外界能量的作用产生电子——空穴对，这一现象称为本征激发。

半导体因为本征激发存在两种载流子，即带负电的自由电子和带正电的空穴。这是在导电方面，半导体与导体最大的不同点（导体中只有自由电子一种载流子）。在常温下，因为本征半导体中的电子——空穴对很少，所以导电能力很弱。

此外，半导体还具有显著的光敏性、热敏性和杂敏性，即当受到外界光和热的刺激时，半导体中的电子——空穴对大量增加，其导电能力显著增强；在本征半导体中有选择地掺入微量杂质，其导电能力也将大为提高而接近导体。

二、杂质半导体

掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

例如在硅中掺入少量的五价元素（如磷），就会多出现电子载流子，掺入的五价元素越多，产生的电子数量越多，电子成为多数载流子，简称多子；因为仍有电子——空穴对产生，这时空穴成为少数载流子，简称少子。这种半导体主要是电子导电，称为电子型半导体，简称 N 型半导体。

在硅中掺入少量的三价元素（如硼），就会多出现空穴载流子，掺入的三价元素越多，产生的空穴数量越多，空穴成为多子，同理，电子成为少子。这种半导体主要是空穴导电，称为空穴型半导体，简称 P 型半导体。

三、PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

在一块本征半导体上，通过特殊工艺，在它的一边掺入微量的三价元素（如硼）形成 P 型半导体，在它的另一边掺入微量的五价元素（如磷）形成 N 型半导体。这样，在两种半导体交界面的两侧存在着电子和空穴的浓度差，N 区的（多子）电子要向 P 区扩散与 P 区的空穴复合，同时，P 区的（多子）空穴要向 N 区扩散与 N 区的电子复合，如图 1-1 (a) 所示。多子向对方扩散的结果是，在交界面的两侧出现了数量相等的正、负离子，这些离子

不能移动，因此形成了一个很薄的空间电荷区，这就是 PN 结，如图 1-1 (b) 所示。在 PN 结产生内电场，其方向由 N 区指向 P 区。该内电场对（多子向对方的）继续扩散起阻碍作用，同时，有利于 N 区和 P 区中的少子向对方漂移，结果使 PN 结变窄，又使扩散容易进行，当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时，就形成了一定厚度的 PN 结。

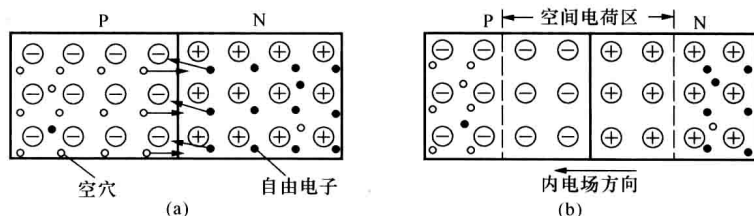


图 1-1 PN 结的形成

(a) 多数载流子的扩散；(b) 形成的 PN 结

2. PN 结的单向导电性

PN 结的外加电压称为偏压。

(1) PN 结外加正偏压。这是指电源的正极接 P 端，负极接 N 端，如图 1-2 (a) 所示。此时，外加电压在 PN 结上建立的外电场方向与内电场方向相反，使 PN 结变窄，有利于多子的扩散，不利于少子的漂移，多子的扩散运动大于少子的漂移运动，从而形成较大的正向电流。由于电源不断向半导体提供电荷，使电流得以维持，这时 PN 结处于（低阻的）导通状态。

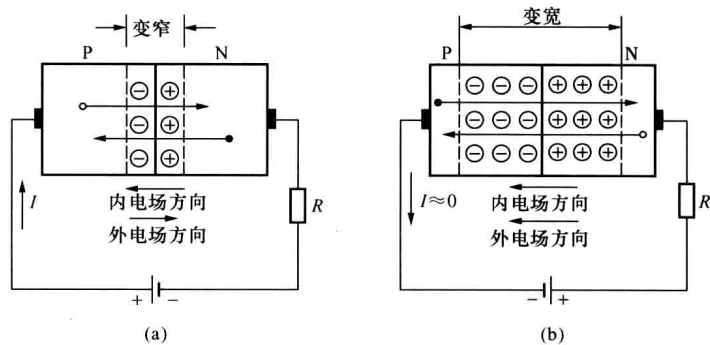


图 1-2 PN 结的单向导电性

(a) 正偏压；(b) 反偏压

(2) PN 结外加反偏压。这是指电源正极接 N 端，负极接 P 端，如图 1-2 (b) 所示。此时，外加电压在 PN 结上建立的外电场方向与内电场方向相同，使 PN 结变厚，多子的扩散难以进行，仅有少子漂移形成很小的电流，可以认为 PN 结基本不导通，这时 PN 结处于反向（高阻的）截止状态。

第二节 半导体二极管

一、二极管的结构、符号及类型

半导体二极管简称二极管。二极管是在一个 PN 结的两侧引出电极，然后用管壳封装而

成。由 P 区引出的电极称为阳极或正极，由 N 区引出的电极称为阴极或负极。二极管的图形符号如图 1-3 (a) 所示，箭头为二极管导通时电流的方向，文字符号为 V，双字母为 VD。二极管的外形如图 1-3 (b) 所示。

二极管有各种类型。按管心结构的不同，可分为点接触型和面接触型。点接触型二极管的 PN 结面积小，结电容小，可用于高频电路和小电流整流电路；面接触型二极管的 PN 结面积大，结电容大，可用于低频电路和大电流整流电路。

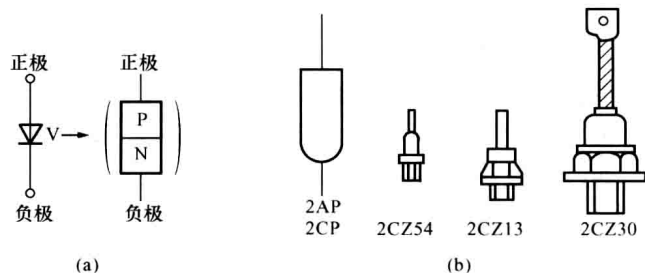


图 1-3 半导体二极管

(a) 图形符号；(b) 外形

二极管按材料的不同，可分为硅管（一般为面接触型）和锗管（一般为点接触型）；按用途的不同，可分为普通管、整流管和开关管等。

国产二极管的型号组成及其意义详见附录 A 中表 A-1。

二、二极管的伏安特性

二极管两端的电压与流过的电流之间的关系可用伏安特性曲线表示。伏安特性可通过实验得出，图 1-4 所示为二极管的伏安特性，它分为正向特性和反向特性两部分。

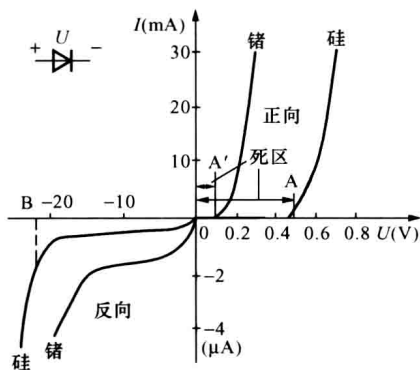


图 1-4 二极管的伏安特性曲线

在正向特性中，当外加电压较小时，外电场不能克服内电场对多子扩散运动的阻碍作用，使得正向电流几乎为零，这时二极管并未导通，此段（图 1-4 中 $0A'$ 、 $0A$ 段）称为死区，对应的电压称为死区电压或门槛电压，通常硅管约为 0.5V，锗管约为 0.1V；当正向电压大于死区电压后，内电场被大大削弱，正向电流迅速增加，这时的二极管才真正导通。导通时的正向压降：硅管为 0.6~0.7V，锗管为 0.2~0.3V。

在反向特性中，当反向电压在一定的范围内，少子的漂移运动形成很小的反向电流基本不变，故称为反向饱和电流。一般硅管的反向饱和电流比锗管小，

在几微安以下，锗管则可达几百微安。反向饱和电流受温度的影响比较明显。当外加电压增加到一定的数值时，反向电流突然增大，反向电压几乎不变，这种现象称为反向击穿，此时的反向电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。普通二极管击穿后 PN 结被烧坏，造成二极管永久性损毁。

由伏安特性可知二极管是一个非线性电阻元件。在分析二极管电路时，常将二极管理想化，即把二极管正向导通时看成短路，反向截止时看成开路。

三、二极管的主要参数

二极管的参数是正确选择和使用的依据。

(1) 最大整流电流 I_{FM} ：指二极管长期工作，允许通过的最大正向平均电流。在规定的散热条件下工作时，若二极管正向平均电流超过此值，将因 PN 结的温升过高而烧坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} : 指二极管工作时允许承受的最高反向电压, 一般取反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

(3) 最大反向电流 I_{RM} : 是指二极管在最高反向工作电压时的反向电流。 I_{RM} 越小, 说明二极管的单向导电性越好。

部分国产 N 型硅整流二极管参数见附录 A 中的表 A-2。

四、二极管的简易测试

二极管的简易测试是利用万用表的欧姆档进行的。万用表欧姆档测量电阻时的内部原理接线如图 1-5 所示。图中 E 为干电池, 它与磁电式测量机构、固定电阻 R 串联后, 再接到万用表的接线插孔(或柱) a、b 上。

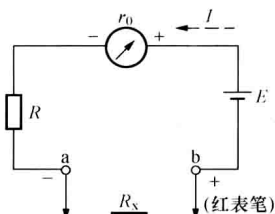


图 1-5 测量电阻时
万用表内部原理接线

对二极管简易测试的依据是二极管正、反向电阻大小不同。测试时, 先将万用表的切换开关旋转到电阻档的 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 档, 而后用万用表的两个表笔分别接到二极管的两个管脚上, 测其阻值, 然后将表笔对换再测试。若前后两次测得的阻值差别大, 则说明二极管是好的。其中测得阻值较小的那一次, 红表笔接的一端为二极管的阴极, 黑表笔接的另一端为二极管的阳极, 若两次测得的阻值均为无限大, 则表明二极管内部断路; 若两次测得的阻值均为零, 则表明二极管内部短路; 若两次测得阻值接近, 则表明二极管的性能变差。

注意: 测试时不能选择 $R \times 1$ 档, 否则, 二极管可能因流过的电流过大而烧坏; 也不能选择 $R \times 10k$ 档(此档, 表内由 1.5V 电池换接为 15V 电池), 否则, 二极管可能因电压过高而击穿。

第三节 专用二极管

除前述普通二极管外, 还有一些特殊用途的二极管。

一、稳压二极管

稳压二极管简称稳压管, 被广泛应用于稳压电源和限幅电路中。

稳压管是面接触型硅二极管, 因特殊的结构及良好的散热条件, 能在规定的电流范围内工作在反向击穿区。其图形符号及伏安特性如图 1-6 所示, 文字符号为 V, 双字母为 VS。

稳压管反向接入电路, 工作在稳压区 AB 段。可见, 在工作电流很大的变化范围 ($I_{ZA} \sim I_{ZB}$) 内, 电压变化量 (ΔU_Z) 却很小, 这正体现了稳压管的稳压特性。

稳压管的主要参数如下:

(1) 稳定电压 U_Z 。它是稳压管的反向击穿电压。其值比普通二极管反向击穿电压低。同一型号的稳压

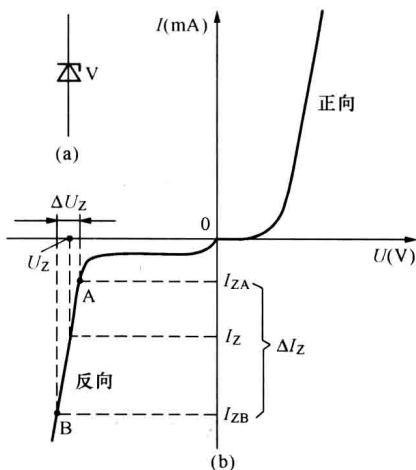


图 1-6 稳压管

(a) 图形符号; (b) 伏安特性

管 U_Z 值不同, 具有分散性。半导体器件手册中只给出 U_Z 的范围, 使用前应测试。

(2) 稳定电流 I_Z 。它是稳压管稳定电压的工作电流。当电流小于 I_Z 时稳压效果很差, 故也常将 I_Z 记为 I_{Zmin} (最小值)。

(3) 最大稳定电流 I_{ZM} 。它是允许通过的最大反向电流, 超过此值, 管子会因过热而烧坏。

部分国产硅稳压管参数见附录 A 中的表 A-3。

二、光电二极管

光电二极管又称为光敏管或光电管。它是将光信号转换成电信号的器件, 因此在光控系统中广泛应用。光电二极管的 PN 结工作在反向偏置状态下, 接收外部的光照时, 其反向电流随光照强度的增大而上升, 从而将光信号转换成相应的电信号, 其原理结构及图形符号如图 1-7 所示。光电二极管在使用时, 其反偏电压不能超过允许的最大反向电压。

三、发光二极管

发光二极管是用碳化硅、砷化镓、磷砷化镓等半导体材料制成的 PN 结作管心, 用透光材料作管壳封装而成。当 PN 结加正向偏压时, 电子和空穴在扩散的过程中复合, 并以光能的形式释放出能量。由于 PN 结的材料不同, 发光的颜色也不同, 有红、黄、绿等颜色。发光二极管在自动控制和电子仪表中常作状态或数字的显示, 其外形及图形符号如图 1-8 (a)、(b) 所示。为了显示多种状态, 可做成数码管, 见图 1-8 (c)。

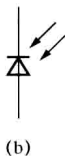
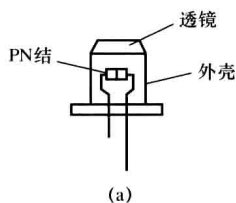


图 1-7 光电二极管

(a) 原理结构; (b) 图形符号

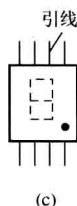


图 1-8 发光二极管

(a) 外形; (b) 图形符号; (c) 数码管

第四节 半 导 体 三 极 管

一、半导体三极管的结构与符号

半导体三极管又称晶体管, 简称三极管。它是由 P 型和 N 型半导体交错三层组成, 每层分别引出电极而构成三端元件, 其外形如图 1-9 所示。

根据排列方式不同, 三极管可分为 PNP 型和 NPN 型两种类型, 其结构示意图及图形符号如图 1-10 所示, 文字符号为 V。

由图 1-10 可见, 三极管具有两个 PN 结, 它们把三极管管芯划分为发射区、基区和集电区, 由三个区分别引出相应的电极: 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 (图 1-10 中 J1); 集电区和基区之间的 PN 结称为集电结 (图 1-10 中 J2)。在图形符号中, 发射极的箭头方向表示三极管正常工作时发射极电流的方向。

三极管的结构特点是: 基区掺杂浓度很小且很薄; 发射区掺杂浓度很高, 远大于基区和集电区; 集电结面积较大。

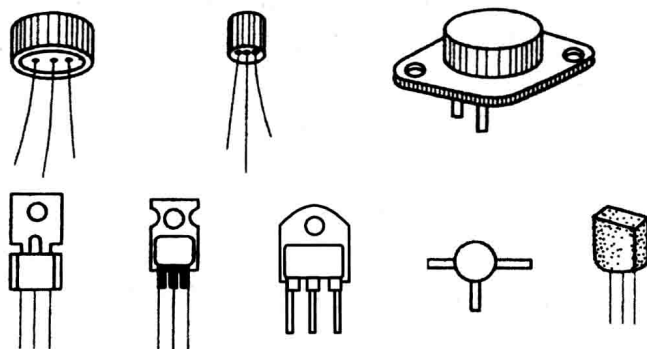


图 1-9 常用三极管的外形图

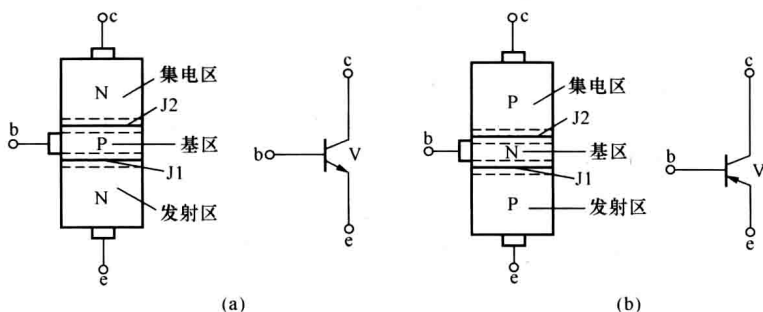


图 1-10 三极管的结构示意图及图形符号

(a) NPN 型; (b) PNP 型

三极管除按排列方式分类外，还可以按材料分为硅管和锗管；按使用频率分为低频管和高频管；按管子功耗分为小、中、大功率管。

国产三极管的型号组成及其意义见附录 A 中表 A-1。

二、三极管的电流放大作用

1. 三极管电流放大的电压条件

三极管具有电流放大作用的外部电压条件是发射结正偏（压），集电结反偏（压）。从三极管电极的电位来看，当管子处于电流放大状态时，对于 NPN 管，应是 $V_B > V_E$ ， $V_C > V_B$ ，

即 $V_C > V_B > V_E$ ；对于 PNP 管，应是 $V_B < V_E$ ， $V_C < V_B$ ，即 $V_C < V_B < V_E$ 。

2. 三极管的电流放大原理

三极管的电流放大作用是由内部载流子的运动规律决定的。为了分析清晰，仅讨论管子内部三个区中起主要作用的多数载流子的运动规律。现以图 1-11 所示的 NPN 管子为例说明其电流放大作用。图中三极管已满足电流放大的电压条件。

因发射结为正偏，N 型发射区的电子（多子）大量扩散，越过发射结注入基区，形成发射极电流 I_E ；注入到基区的大量电子由于浓度差继续向集电结扩散，途中部分扩

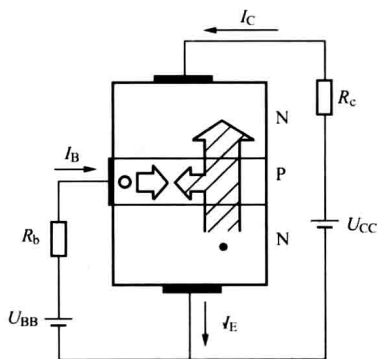


图 1-11 三极管电流放大时内载流子运动规律示意

散电子与基区中的空穴（多子）复合。为了维持基区中原有的空穴数量，电源 U_{BB} 从基区拉走电子，形成基极电流 I_B ，因为基区很薄且空穴浓度很低，继续扩散的电子与空穴复合的机会很少，所以 I_B 很小；由于集电结的反偏压较大，阻挡层较厚，不利于 N 型集电区的电子（多子）向基区扩散，而有利于收集从基区向集电结扩散来的电子，加之集电结的面积大，更有利于对电子的收集，因此，基区中扩散到集电结边缘的电子被集电结电场加速顺利越过集电结进入集电区，在电源 U_{CC} 的作用下，形成集电极电流 I_C 。

显然， $I_C \gg I_B$ ， $\Delta I_C \gg \Delta I_B$ ，即一个很小的基极电流或增量对应着一个大的集电极电流或增量。这就是三极管的电流放大作用。

I_C 与 I_B 的比值称为三极管的直流电流放大系数，用 $\bar{\beta}$ 表示，即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-1)$$

$\bar{\beta}$ 表明三极管的电流放大能力。

根据 KCL，三极管三个电极间的电流关系为

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-2)$$

三、三极管的伏安特性曲线

下面介绍常用的 NPN 型三极管共发射极电路的伏安特性曲线。

1. 输入特性曲线

NPN 型管共发射极特性测试电路如图 1-12 所示，其中发射极为输入和输出的公共端。当集电极和发射极之间的电压 U_{CE} 一定时，基极电流 I_B 与基极和发射极之间的电压 U_{BE} 的关系曲线称为输入特性曲线，如图 1-13 所示。

当 $U_{CE} = 0V$ 时，相当于 C 和 E 间短路，发射结和集电结均为正偏，三极管相当于两个二极管并联，此时的输入特性曲线相当于二极管的正向伏安特性曲线。

当 $U_{CE} > 0V$ 时，随着 U_{CE} 的增大，输入特性曲线右移，但当 $U_{CE} \geq 1V$ 以后，曲线右移不明显，基本重合在一起。这是因为集电结反偏电压已足够强，足以使扩散到基区的绝大多数电子被吸收到集电区，即使再增大 U_{CE} 也不会引起 I_B 变化了，因此半导体手册一般只给出 $U_{CE} \geq 1V$ 的一条输入特性曲线。

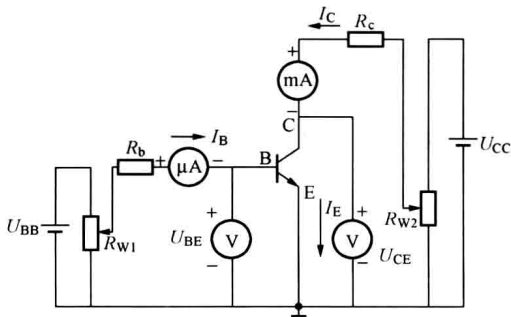


图 1-12 三极管特性曲线测试电路

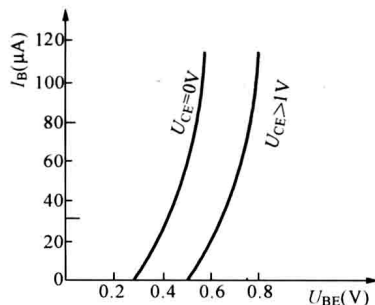


图 1-13 硅三极管的输入特性曲线

由图 1-13 可见，三极管的输入特性与二极管正向特性相似，是非线性的，也有一段死区，硅管约为 $0.5V$ ，锗管约为 $0.1V$ 。当三极管正常工作时，发射结电压 U_{BE} 变化不大，硅管的正向电压为 $0.6 \sim 0.7V$ ，锗管为 $0.2 \sim 0.3V$ 。

2. 输出特性曲线

当基极电流 I_B 一定时, 集电极电流 I_C 与集电极和发射极之间的电压 U_{CE} 的关系曲线称为输出特性曲线, 如图 1-14 所示。

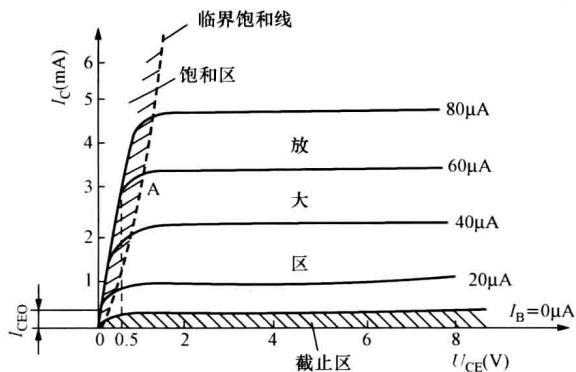


图 1-14 三极管的输出特性曲线

在不同的 I_B 下, 可得出不同的曲线, 多条输出特性曲线是一组曲线, 称为曲线簇。输出特性曲线表明: 当 I_B 不变、 U_{CE} 从零开始增大时, 集电极电流 I_C 随 U_{CE} 增大而很快增大, 使曲线起始部分较陡。但当 U_{CE} 较大 ($\geq 1V$) 后, 从发射区扩散到基区的电子中的绝大部分被收集到集电区而形成 I_C , 以致 U_{CE} 继续增加时, I_C 也不再有明显的增加, 因此曲线比较平坦, 近似为一条水平直线。当 I_B 增大时, 水平直线上移, 而且 I_C 比 I_B 增加得多得多,

这体现了三极管的电流放大作用。

通常把三极管的输出特性曲线簇分为三个工作区: 放大区、截止区和饱和区。

(1) 放大区。输出特性曲线簇近于水平的部分就是放大区, 也称线性区。三极管处于放大状态的条件是: 发射结正偏压, 集电结反偏压。当管子工作在放大区时, 若 I_B 不变, 则当 U_{CE} 变化时, I_C 基本不变, 即具有恒流特性; 当 I_B 改变, 则 I_C 随之改变, 即 I_C 受 I_B 控制, $I_C = \beta I_B$, 具有电流放大作用。

(2) 截止区。 $I_B \leq 0$ 的区域就是截止区。三极管处于截止区的条件是: 发射结和集电结均反偏压。在截止区, 三极管各电极电流近似为零, 各极间相当于断开的开关。

(3) 饱和区。所有曲线拐点的连线与纵坐标轴之间所夹的区域称为饱和区。管子工作在饱和区的条件是: 发射结和集电结均正偏压。工作在饱和区时, 集电结收集电子的能力很弱, I_B 失去对 I_C 的控制作用, 这时三极管失去电流放大作用, 但 I_C 随 U_{CE} 的增大而急剧增大, 这与放大区的特点有着显著的不同。三极管饱和时的集电极和发射极之间的电压称为“饱和压降”, 用 U_{CES} 表示。小功率三极管 U_{CES} 很小 (硅管约 0.3V, 锗管约 0.1V), 这时, 三极管 C、E 之间相当于开关的闭合状态。

四、三极管的主要参数

三极管的参数是表示其特性和极限使用条件的重要数据, 是正确选择和使用三极管的依据。

1. 共发射极电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 β

当接成共发射极电路的三极管工作在静态 (无交流输入信号) 时, 集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值称为共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$, 即 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$ 。

当三极管工作在动态 (有输入交流信号) 时, 集电极电流的变化量 ΔI_C 与相应的基极电流变化量 ΔI_B 的比值称为共发射极交流电流放大系数 β , 即 $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 。

$\beta \approx \bar{\beta}$, 常用三极管的 β 值在 20~100 之间。

2. 集—射极反向饱和电流 I_{CEO}

I_{CEO} 是当 $I_{\text{B}}=0$ (将基极开路), 集电结处于反偏和发射结处于正偏时的集电极电流。它好像是从集电区直接穿过基区流入到发射区的电流, 所以又称为穿透电流 (见图 1-14)。

若分析电流放大作用忽略 I_{CEO} 的影响时, 按 $I_{\text{C}}=\beta I_{\text{B}}$ 计; 当考虑 I_{CEO} 时, 三极管的集电极电流应为

$$I_{\text{C}} = \beta I_{\text{B}} + I_{\text{CEO}} \quad (1-3)$$

I_{CEO} 不受 I_{B} 控制, 但温度变化对 I_{CEO} 的影响很大, 且 β 越大, I_{CEO} 受温度影响越大。选用三极管时, 为了避免影响放大电路的稳定性, 应选择 I_{CEO} 尽可能小些的三极管, 同时 β 也不是越大越好, 应兼顾考虑。

3. 集—射极反向击穿电压 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$

集—射极反向击穿电压 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$ 是指基极开路时, 加于集电极与发射极间允许的最大反向电压值。使用三极管时, U_{CE} 不能超过此值, 否则将使管子发生击穿而导致损坏。

4. 集电极最大允许电流 I_{CM}

当集电极电流 I_{C} 超过一定值时, 三极管的 β 值要下降, 为使三极管正常工作, 就要限制 I_{C} 。当 β 值下降到正常值 $2/3$ 时的集电极电流, 称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。因此, 在使用三极管时, I_{C} 超过 I_{CM} 并不一定会使三极管损坏, 但放大性能已很差而失去意义。

5. 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

三极管工作在放大状态时, 集电结反偏, 结电阻很大, 过大的 I_{C} 通过集电结产生过大的热量, 使结温严重升高, 必将使管子的特性变坏甚至烧毁。因此, 对集电结的耗散功率应有限制, 集电结允许承受的最大功率称为最大允许耗散功率 P_{CM} , 使用时应满足: $U_{\text{CE}} I_{\text{C}} < P_{\text{CM}}$ 。

部分国产半导体三极管主要参数见附录 A 之三。

五、三极管的简易测试

三极管的三个电极在外观排列上有一定规律和标识。在实际使用中, 若遇到没有相关手册或标识不清时, 为正确使用三极管, 可用万用表进行简易测试。

1. 判断三极管的基极和管型

根据三极管的特点, 首先判断基极比较容易。具体方法是, 将万用表切换到电阻档的 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 档并调零。用黑表笔接三极管的任一管脚, 用红表笔接触其余两个管脚, 如果两次测得的电阻值都很大或都很小, 则黑表笔所接触的管脚为基极。若测得的两电阻值都很小, 说明该管为 NPN 管; 若测得的两个电阻都很大, 说明该管为 PNP 管。

2. 判断发射极和集电极

当基极和管型判断出来以后, 就可判断三极管的发射极和集电极了。假定某个电极为集电极, 在基极和集电极之间接上一个 $100k\Omega$ 的电阻。对于 NPN 管, 用黑表笔接假定的集电极, 红表笔接假定的发射极, 记录阻值; 再假定另一个电极为集电极, 用上述同样的方法进行测量, 记录阻值, 阻值较小的那次, 黑表笔所接的为集电极, 红表笔所接的为发射极。对于 PNP 管, 用红表笔接假定的集电极, 黑表笔接假定的发射极, 记录阻值; 再假定另一个电极为集电极, 用上述同样的方法进行测量, 阻值较小的那次, 红表笔所接的为集电极。在实际测量中, 也可用手捏住集电极和基极, 用接触电阻代替 $100k\Omega$ 电阻。

本章小结

(1) 半导体材料是制造各种半导体器件的物质基础，它具有掺杂、热敏和光敏特性，在常温下，内部存在着少量的电子和空穴两种载流子。利用掺杂特性，在本征半导体中掺入不同的杂质，可形成P型和N型两种“杂质”半导体。P型半导体中，多子是空穴，少子是电子；N型半导体中，多子是电子，少子是空穴。

(2) P型和N型半导体相接触，在交接面处形成空间电荷区——PN结，它是构成各种半导体器件的物质基础，其基本特性是具有单向导电性。

(3) 二极管就是具有一个PN结的半导体器件，其基本特性是单向导电性，主要参数是最大整流电流(I_{FM})和最高反向工作电压(U_{RM})。

常用的专用二极管：硅稳压管、光电管和发光二极管。

(4) 半导体三极管是由两个PN结构成的，有NPN型和PNP型两类，它的基本特性是具有电流放大作用，它是一种电流控制器件。三极管的三个电极电流分配关系为 $I_E = I_B + I_C$ 。

(5) 表明三极管工作特性的是它的输入特性和输出特性，其输入特性与二极管的正向特性相似，三极管的输出特性可以分为三个工作区：放大区、截止区和饱和区。它工作在放大区时，集电极电流具有受(I_B)控特性和恒流特性，其外部的偏压条件是发射结正偏，集电结反偏；工作在截止区时，各极电流很小，各极间相当于开路，其外部的偏压条件是发射结、集电结均反偏；工作在饱和区时，三极管的 I_B 失去对 I_C 的控制作用，随 I_B 增加 I_C 增加很少，三极管无放大作用，集、射极间相当于短路，其外部的偏压条件是发射结和集电结均正偏。

习 题 一

1-1 N型半导体中的多数载流子是_____，少数载流子是_____；P型半导体中的多数载流子是_____，少数载流子是_____。

1-2 PN结具有_____性能，即外加正偏压时，PN结_____，此时正向电阻_____；外加反偏压时，PN结_____，此时反向电阻_____。

1-3 当温度升高时，二极管的反向饱和电流会_____。

1-4 二极管正向导通时，硅管的正向压降约为_____，锗管的正向压降约为_____。

1-5 如何利用万用表对二极管的简易测试，判别二极管的好坏以及管脚的极性（名称）？

1-6 稳压二极管的工作偏压与普通二极管的工作偏压有何不同？它的稳压特性是如何体现的？

1-7 光电二极管与发光二极管的工作偏压有何不同？两者作用各是什么？

1-8 三极管由两个PN结组成，那么是否可用两只二极管反向串联起来当做一只三极管使用？