



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

(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

(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。

全书分上、下两册。

《电工学》(上册)(电工技术)共七章,内容包括电工基础、变压器、感应电动机、直流电动机、同步发电机、微控制电机、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》(下册)(电子技术)共五章,内容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、整流电路、数学电路等。

本书可作为高职、高专非电类专业教材,亦可作为成人高等教育教材和相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工学/王浩主编. —北京:中国电力出版社,2006

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-3768-9

I. 电... II. 王... III. 电工学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第153854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>)

三河德利印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年1月第一版 2006年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 上、下册:20.75印张 上、下册:430千字

印数 0001—3000册 上、下册定价 27.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

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，并列人教育部《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，又列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等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

(下 册) 电 子 技 术

前 言

第一章	半导体二极管及三极管	1
	第一节 半导体二极管	1
	第二节 半导体三极管	4
	第三节 场效应管简介	9
	本章小结	11
	习题一	11
第二章	三极管交流放大电路	13
	第一节 共发射极基本放大电路	13
	第二节 共发射极基本放大电路的分析	15
	第三节 静态工作点的稳定	20
	第四节 多级电压放大器	22
	第五节 放大器的负反馈	24
	第六节 常用的交流负反馈放大电路	28
	第七节 功率放大器	30
	第八节 正反馈与正弦波振荡器	32
	本章小结	36
	习题二	37
第三章	集成运算放大器	40
	第一节 直流放大器	40
	第二节 差动放大电路	41
	第三节 集成运算放大器	44
	第四节 集成运放的基本运算	47
	第五节 集成运放的应用举例	50
	本章小结	51
	习题三	52
第四章	整流电源	54
	第一节 整流电路	54
	第二节 滤波电路	57
	第三节 稳压电路	59
	第四节 晶闸管	62
	第五节 可控整流电路	64

第六节	晶闸管的触发电路	66
本章小结		69
习题四		69
第五章	数字电路基础	71
第一节	概述	71
第二节	基本逻辑门电路	72
第三节	集成 TTL 与非门电路	75
第四节	逻辑代数与逻辑函数化简	77
第五节	二进制数与组合逻辑电路	79
第六节	触发器	82
第七节	寄存器和计数器	87
第八节	译码器与数字显示	91
第九节	模/数转换器 (ADC)	94
第十节	数/模转换器 (DAC)	97
第十一节	555 定时器及其应用	99
第十二节	数字电路应用举例	102
本章小结		107
习题五		108
(下册) 附录		111
一、	半导体器件型号命名和主要参数	111
二、	集成电路型号和主要参数	116
(下册)	部分习题参考答案	119
参考文献		121

半导体二极管及三极管

第一节 半导体二极管

一、PN结

PN结是构成各种半导体器件的基础，我们先来了解半导体的基本知识，然后再介绍PN结的形成及其特点。

1. 半导体的基本知识

导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体，常用的半导体材料有硅和锗。半导体的导电能力具有热敏特性和光敏特性，即当半导体受到外界热和光的刺激时，它的导电能力将显著增强。

纯净的半导体又称为本征半导体，具有晶体结构。硅和锗原子的最外层电子都是4个，称为价电子，因此硅和锗为四价元素。当一个原子的最外层轨道有8个电子时，其结构最稳定。在本征半导体晶体结构中，每一个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成一个电子对，它们把相邻的原子结合在一起，构成最稳定的共价键结构。在绝对温度为0K或低于此温度时，由于本征硅或锗的最外层电子无法挣脱共价键的束缚成为自由电子，所以不能导电。当温度升高或有光照射时，受共价键束缚的部分电子获得足够的能量后，挣脱共价键的束缚成为自由电子，同时在共价键中留下一个空位，称为空穴。失掉电子的原子因中性被破坏而带正电，因此，我们说空穴带正电。电子和空穴是成对出现的。这种在本征半导体中因受热而产生的电子和空穴对的现象称为本征激发。在外电场作用下，有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子来填补这个空穴，这样相邻原子出现另一个空穴，如此继续下去，就好像空穴在运动，其运动方向相当于正电荷移动的方向。因此，当半导体两端加上外电压时，电子和空穴都会进行定向移动，形成电流，即在半导体中存在电子导电和空穴导电。这是半导体导电的最大特点。也就是说半导体中，存在两种载流子——自由电子和空穴。

2. P型半导体和N型半导体

本征半导体中虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量极少，导电能力很低。如果在本征半导体中掺入微量的“杂质”，将使掺杂后的半导体（杂质半导体）的导电性能大大增强。在本征半导体硅或锗的晶体中掺入微量的磷（P）等五价元素的杂质后，由于磷原子参加共价键结构只需四个价电子，多余的一个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。于是半导体中的自由电子数目大量增加，自由电子导电成为这种半导体导电的主要方式，故称它为电子型半导体或N型半导体。其中自由电子是多数载流子，简称多子；空穴是少数载流子，简称少子。

在本征半导体硅或锗的晶体中掺入微量的硼（B）等三价元素的杂质后，由于硼原子只有三个价电子，在构成共价键结构时，因缺少一个电子而形成空穴。于是在半导体中就出现了大量空穴，空穴导电成为这种半导体导电的主要方式，故称它为空穴型半导体或P型半导体。其中空穴是多子，自由电子是少子。

不论是P型半导体还是N型半导体，它们的多子浓度都取决于掺入“杂质”的数量，

而少子是由本征半导体激发产生的,其数量受温度的影响。应注意,无论何种半导体,作为整体是不带电的。

3. PN 结及其单向导电性

(1) PN 结。采用特殊工艺,在一块半导体的两边分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,它们的交界面便形成一个空间电荷区,称为 PN 结,如图 1-1 所示。

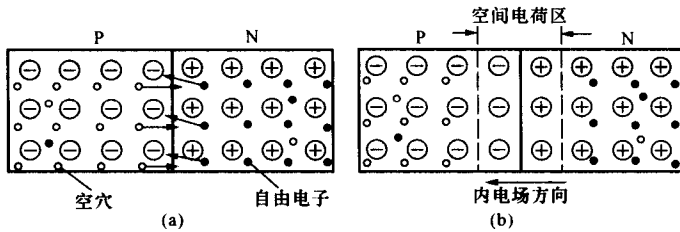


图 1-1 PN 结的形成

(a) 多数载流子的扩散; (b) 形成的 PN 结

由于在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面两侧的自由电子和空穴的浓度不一样,因此, P 区的多数空穴向空穴很少的 N 区扩散,并与 N 区的自由电子复合;同时 N 区的多数载流子自由电子向电子很少的 P 区扩散,并与 P 区的空穴复合,如图 1-1 (a) 所示。这种由于载流子浓度差而形成的定向运动称为扩散运动。扩散运动的结果使靠近交界面的 P 区出现负离子,靠近交界面的 N 区出现正离子,如图 1-1 (b) 所示。这样,两种半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区,这就是 PN 结。因 PN 结在 P 区一侧带负电,在 N 区一侧带正电,从而形成一个内电场,其方向由 N 区指向 P 区,见图 1-1 (b),内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用。但另一方面,少子(P 区的自由电子和 N 区的空穴)在内电场的作用下,越过空间电荷区,移动到对方,这种少子的定向运动称为漂移运动。

在扩散刚开始时,没有空间电荷区,扩散作用大于漂移作用,随着扩散的进行,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐渐增加,漂移作用也逐渐加强,而扩散作用则逐渐减弱。当漂移运动和扩散运动达到动态平衡时,空间电荷区的宽度基本上稳定下来,PN 结就处于相对稳定的状态。

(2) PN 结的单向导电性。当 PN 结的 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极,即 PN 结加正向电压(简称正偏)时,如图 1-2 (a) 所示。外加电压的电场方向与内电场方向相反,PN 结内的电场减弱,破坏了扩散运动和漂移运动的平衡,漂移电流减少,扩散电流增大,形成 PN 结的正向电流。正向电流由多子的扩散运动形成,因而正向电流随外加电压的增大而迅速增大,这时,PN 结呈现的正向电阻很小,即 PN 结导通。

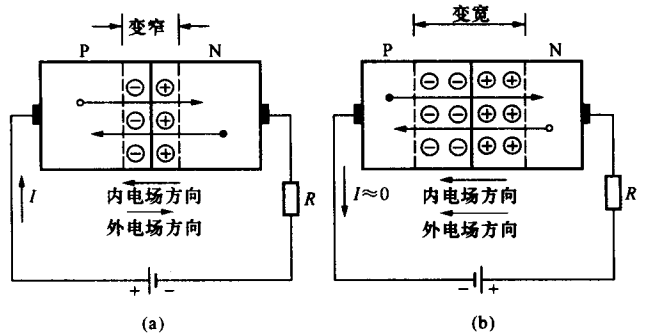


图 1-2 PN 结的单向导电性

(a) 正偏; (b) 反偏

当 PN 结的 P 区接电源的负极, N 区接电源的正极时,即 PN 结加反向电压(简称反偏)时,如图 1-2 (b) 所示。外加电压的电场与内电场的方向相同,PN 结内的电场增强,扩散电流减小而漂移电流增大,形成 PN 结的反向电流。反向电流是由少子漂移形成的,所以反向电流非常小,近似为零,PN 结呈现的反向电阻很大,即 PN 结截止温度对反向电流的影响很大。

由以上分析可知，PN 结正偏压时导通；PN 结反偏压时截止，即 PN 结具有单向导电性。

二、半导体二极管的结构、符号及类型

半导体二极管由一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳构成，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。按材料不同可分为硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等；按结构不同可分为面接触型和点接触型二极管。其外形及图形符号如图 1-3 所示。图形符号中的箭头表示正向电流方向，文字符号为 V (或 VD)。二极管型号的组成及型号各部分的含义详见附录一之 (一)。

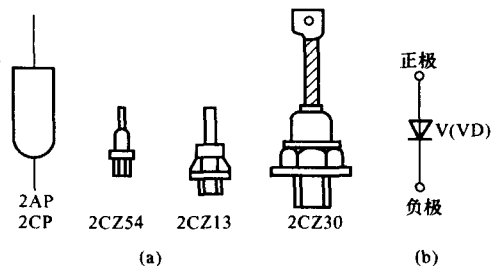


图 1-3 半导体二极管

(a) 外形及型号；(b) 图形符号及文字符号

面接触型二极管特点是 PN 结面积大，结电容大，适用于低频大电流电路，一般用作整流。点接触型二极管的特点是 PN 结面积小，结电容小，适用于高频和小电流电路中。

三、二极管的伏安特性

二极管最基本的特性就是单向导电性，可用伏安特性曲线描述。二极管的伏安特性是指二极管两端所加电压与通过电流之间的关系，通常用 $I=f(U)$ 曲线形象地表示这种关系，叫二极管的伏安特性曲线，如图 1-4 所示。

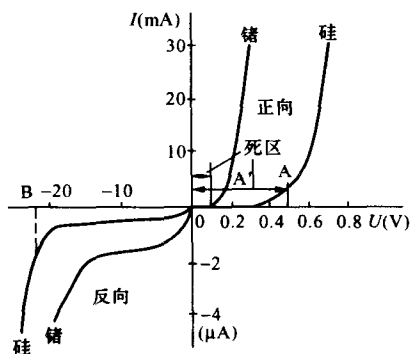


图 1-4 二极管的伏安特性曲线

正向特性曲线分为两个区：死区和正向导通区。当二极管的正向电压很小时，外电场不能克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故几乎没有正向电流通过二极管。只有当正向电压达到一定值时，才有明显的正向电流出现，这个电压数值称为死区电压或门坎电压，其大小与材料及环境温度有关。通常，硅管的死区电压一般约为 0.5V，锗管约为 0.1V。当二极管的正向电压大于死区电压后，有较大的正向电流通过二极管，二极管

处于正向导通区，正向电流随电压的增加而迅速增大，曲线陡直上升，二极管呈现的电阻很小。二极管进入正向导通区的正向电压称为正向导通电压。一般，硅管的正向导通电压为 0.6~0.7V，锗管的正向导通电压为 0.2~0.3V。

反向特性曲线也分为两个区：反向截止区和反向击穿区。在反向截止区内，当二极管加上反向电压时，只有极小的反向电流流过二极管。反向电流有两个特点：一是外加反向电压在一定的范围内，反向电流基本不随反向电压的变化而变，故称它为反向饱和电流；二是当温度升高时，反向饱和电流迅速增加。当外加反向电压增大到一定值时，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。一般二极管反向击穿后，可能导致 PN 结烧坏，因此，二极管工作时所承受的反向电压应小于反向击穿电压。

四、二极管的参数

二极管的参数是表示其特性和极限使用条件的重要数据，是正确选择和使用二极管的依

据。二极管的主要参数如下。

1. 最大整流电流 I_{FM}

I_{FM} 是指二极管长期工作时，所允许流过的最大正向平均电流，由 PN 结的面积和散热条件所决定。二极管使用时的工作电流应小于这个数值，否则，将导致二极管因过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 是指二极管使用时允许承受的最高反向电压。一般取反向击穿电压的一半，以防止二极管发生反向击穿。

3. 反向电流 I_R

I_R 是指二极管未击穿时的反向饱和电流，其值愈小，二极管单向导电性愈好。环境温度对 I_R 的影响较大，使用时应充分注意，尤其是锗二极管。

4. 最高工作频率 f_M

f_M 是指二极管工作频率的上限值，它主要由 PN 结电容的大小决定。当工作频率超过 f_M 时，反向电流很大，二极管的单向导电性变坏。

部分二极管的主要参数见附录一之（二）。

五、二极管的简易测试

二极管、三极管的简易测试是用万用表的欧姆档进行的。用欧姆档测量电阻时，万用表内部的原理接线如图 1-5 所示。图中电源为干电池，它与磁电式测量机构和固定电阻 R 串联后，再接到万用表的接线插孔（或柱）a、b 上。

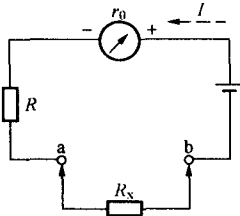


图 1-5 测量电阻时万用表内部原理接线

应当指出，万用表内接干电池的负极侧 b 为正接线柱，标有“+”；干电池的正极侧 a 为负接线柱，标有“-”。对二极管、三极管测试时，红表笔接在万用表的正接线柱上，黑表笔接在负接线柱上。

利用欧姆档对二极管进行简易测试的依据是二极管的正向电阻和反向电阻的大小不同，测试时，先将万用表的切换开关旋到电阻档的 $R \times 100$ 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，再进行测试。若前后两次所测得的阻值差别大，则说明二极管是好的，其中对应于测得阻值较小的那一次，红表笔所接的一端为二极管的负极，黑表笔所接的一端为正极。若两次所测得的阻值均为无穷大，则说明二极管内部发生断路；若两次所测得的阻值均为零，则说明二极管内部发生短路。若两次测得的阻值接近，则说明二极管的性能变差。

除普通二极管外，还有特殊用途的二极管，如稳压二极管、发光二极管。它们的结构及特性将在后面结合应用予以介绍。

第二节 半导体三极管

一、三极管的结构、类型和符号

半导体三极管（又称为晶体管）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 1-6 所示。

根据排列方式的不同，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 1-7 所示，文字符号为 V (VT)。

由图 1-7 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 (图中 J1)；集电区和基区之间的 PN 结称为集电结 (图中 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。

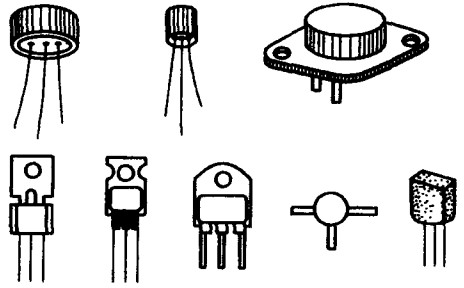


图 1-6 常用半导体三极管的外形图

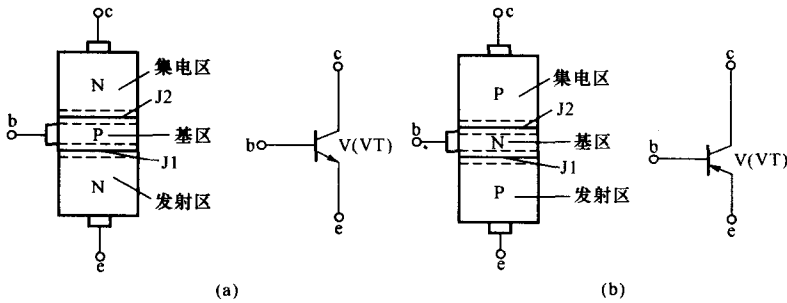


图 1-7 三极管的结构示意图及符号
(a) NPN 型；(b) PNP 型

半导体三极管的种类繁多，除按排列方式分为 PNP 型和 NPN 型外，还可按所用材料分为硅管和锗管；按使用频率范围可分为低频管和高频管；按管子功耗可分为小功率管、中功率管和大功率管。三极管的型号及其各组成部分含义详见附录一之 (一)。

二、三极管的电流放大作用

三极管具有电流放大作用的内部原因在于①基区很薄 ($1\mu\text{m}\sim$ 几十 μm)，掺杂浓度很低；②发射区的掺杂浓度很高，远大于基区 (和集电区)；③集电结的面积远大于发射结。除上述物质条件外，三极管实现电流放大，还必须具备一定的电压条件。

1. 三极管电流放大的电压条件

三极管电流放大时，应满足的电压条件是：发射结正偏 (压)，集电结反偏 (压)。

根据三极管电极的电位 (V_E 、 V_B 、 V_C 分别为射极、基极、集电极电位) 的大小可以判断其是否处于电流放大状态。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，主要讨论管子内部三个区中的起主要作用的多数载流子的运动规律。现以图 1-8 所示的 NPN 管子为例说明其电流放大原理。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 ；

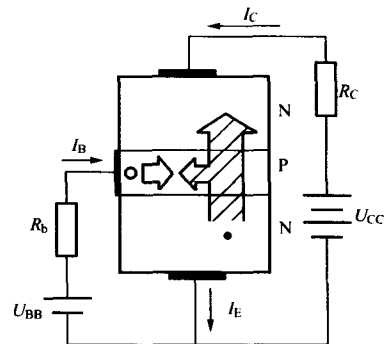


图 1-8 三极管内载流子运动规律示意

在基区的大量注入电子由于浓度差继续向集电结扩散,途中部分扩散的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的电子被集电结电场加速顺利越过集电结,在电源 U_{CC} 的作用下,形成集电极电流 I_C 。

发射区与基区的掺杂浓度比,决定着从发射区扩散到基区的电子中被集电结收集的部分与复合部分的比例,即决定着 I_C (或 ΔI_C) 与 I_B (或 ΔI_B) 的比值。掺杂浓度比越大, I_C (ΔI_C) 与 I_B (ΔI_B) 的比值越大。显然一个很小的基极电流变化量 ΔI_B 对应着一个很大的集电极电流的变化量 ΔI_C 。这就是三极管的电流放大作用。

定义直流集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值为共射极直流电流放大系数,用 $\bar{\beta}$ 表示,即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

一个三极管的发射区与基区的掺杂浓度比是一定的,因此 $\bar{\beta}$ 值也是确定的,一般 $\bar{\beta}$ 在 20~300 之间。

另外由 KCL 可知三极管三个极的电流关系式为

$$I_E = I_B + I_C$$

三、三极管的伏安特性曲线

三极管各电极间电压和各电极电流之间的关系曲线称为三极管的伏安特性曲线,常用的有输入特性曲线和输出特性曲线两种。

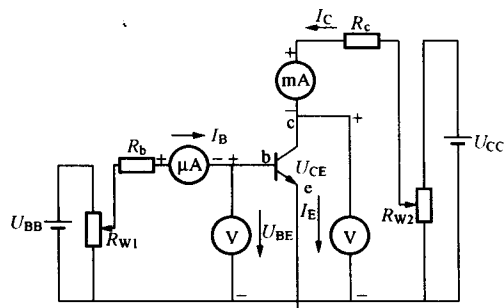


图 1-9 三极管特性曲线测试电路

1. 输入特性曲线

NPN 型三极管共射极测试电路如图 1-9 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 1-10 所示,其表达式为

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

(1) 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。

(2) 当 $U_{CE} > 0V$ 时,随着 U_{CE} 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。这是因为此时集电结反偏压已足够大,足以使扩散到基区的绝大多数自由电子被吸引到集电区,即使再增大 U_{CE} 也不会使 I_B 增大了,因此,半导体手册中一般只给出 $U_{CE} \geq 1V$ 的一条输入特性曲线。共发射极电路的输入特性曲线与二极管的正向特性相似,也有一段死区,硅管约为 0.5V,锗管约为 0.1V,导通后的三极管的发射结电压 U_{BE} 变化不大,硅管的正向电压约为 0.6~0.7V,锗管约为 0.2~0.3V。

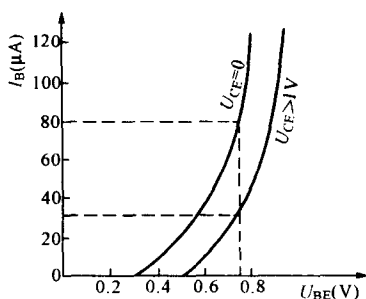


图 1-10 三极管的输入特性曲线

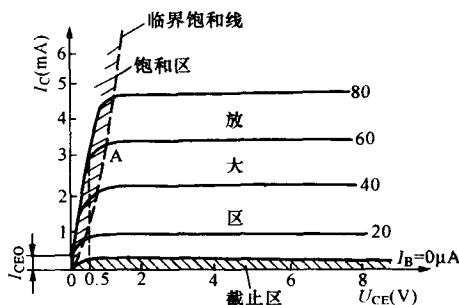


图 1-11 三极管的输出特性曲线

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 1-11 所示。其表达式为

$$I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}}$$

在不同的 I_B 下，可得出不同的曲线，所以输出特性曲线是一组曲线，称为曲线簇。曲线表明：当 I_B 不变时， U_{CE} 从零开始增加，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} 增大 ($\geq 1V$) 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，具有恒流特性。当 I_B 增大时，水平直线上移，而且 I_C 比 I_B 增加得很多，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。管子工作在放大区的特征是 $I_C = \beta I_B$ ， I_C 的大小取决于 I_B 的大小， I_C 几乎与 U_{CE} 无关，这就是三极管的基极电流对集电极电流的控制特性。三极管处于放大状态的条件是：发射结正偏，集电结反偏。

(2) 截止区。 $I_B \leq 0$ 的区域就是截止区。在截止区，三极管各电极电流近似为零，相当于断开的开关。实际上，当 $I_B = 0$ 时， I_C 并不等于零，此时的集电极电流 $I_C = I_{CEO}$ ，称为穿透电流，这是基区少子与集电区少子所形成的漂移电流 I_{CBO} 被放大的结果。三极管处于截止区的条件是：发射结和集电结均反偏。

(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。饱和区的特点是： U_{CE} 很小，一般 $U_{CE} < U_{BE}$ ， $U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} < 0$ ，即发射结和集电结均正偏。在饱和区，集电结收集电子的能力很差， I_B 的变化对 I_C 的影响很小，即 I_B 失去对 I_C 的控制作用，呈现饱和现象。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本质的不同。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，硅管约为 0.3V 左右，锗管约为 0.1V 左右，C 与 E 之间呈现低阻状态，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。三极管的主要参数如下。

1. 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 （输出电流）与基极电流 I_B 的比值称为共发射极直流放大系数 $\bar{\beta}$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

当三极管工作在动态（有输入交流信号）时，基极电流的变化量 ΔI_B 将引起集电极电流的相应变化 ΔI_C 。 ΔI_C 与 ΔI_B 的比值称为交流放大系数 β

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

从概念上讲，两者含义不同，有交、直流之分，但在输出特性曲线近于平行等距并且 I_{CEO} 较小情况下，两者数值较为接近。故在估算时，常用 $\bar{\beta} \approx \beta$ 的近似关系。常用的三极管的 β 值在 20~100 之间。

2. 集—射极反向饱和电流 I_{CEO}

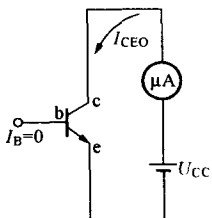


图 1-12 三极管穿透电流 I_{CEO} 的测试电路

I_{CEO} 是当 $I_B = 0$ （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。图 1-12 所示为测试 I_{CEO} 的电路。

当集电结反偏时，集电区的空穴漂移到基区而形成电流 I_{CBO} ，而发射结正偏，发射区的电子扩散到基区，其中绝大部分被收集到集电区，只有极少部分与基区的空穴复合。由于基极开路，因此，在基区参与复合的电子与从集电区漂移过来的空穴数量应相等。故参与复合的电子流也应等于 I_{CBO} ，从发射区扩散的电子不断从电源得到补充，形成电流 I_{CEO} ，这样有

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$

在前面分析电流放大作用时，我们先忽略了 I_{CEO} 的影响，当考虑 I_{CEO} 时，管子的集电极电流应为

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

温度变化对三极管的电流放大系数 β 也有影响，当温度升高时， β 也随之增大。

由于 I_{CBO} 受温度影响很大，故温度变化对 I_{CEO} 和 I_C 的影响很大，且 β 越大， I_{CEO} 受温度影响越大。当温度较低时，可忽略 I_{CEO} 的影响，按 $I_C \approx \beta I_B$ 计。选用管子时，应选择 I_{CBO} 、 I_{CEO} 尽可能小些的管子，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 $U_{(BR)CEO}$

集—射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 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 值下降到规定值 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: $U_{CE} \cdot I_C < P_{CM}$ 。

部分三极管的主要参数, 详见附录一之(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, 若遇到没有手册可查或标识不清时, 为正确使用三极管, 可用万用表进行简单测试。

1. 判断三极管的基极和管型

根据三极管的特点, 首先测试比较容易判断的基极。其具体方法是, 将万用表切换开关旋到电阻档的 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 档并调零。用黑表笔接三极管的某个极不动, 红表笔分别接另外两个极, 若测得的两次电阻值一大一小, 则将黑表笔换接到另一个极不动, 红表笔也换接其它两个极, 直到测得的两次电阻值都很小或都很大为止。若黑表笔不动时, 测得的两个电阻值都很小, 说明黑表笔所接的电极是三极管的基极, 该管为 NPN 管; 若黑表笔不动时, 测得的两个电阻都很大, 说明黑表笔所接的电极是基极, 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与基极(注意两极不能短接)代替 $100k\Omega$ 电阻。

第三节 场效应管简介

场效应管是一种利用电场效应来控制其输出电流大小的半导体器件。它与半导体三极管控制特性不一样, 三极管是电流控制元件, 是通过控制基极电流达到控制集电极电流的目的, 放大信号时需从信号源中吸取电流, 其输入电阻低, 参数受温度影响大。而场效应管是电压控制元件, 它的输出电流取决于输入端电压大小, 基本不需要吸取信号源的电流, 所以它的输入电阻很高, 可达 $10^9 \sim 10^{14}\Omega$ 。

场效应管按其结构的不同分为结型场效应管和绝缘栅场效应管两种。绝缘栅场效应管制造工艺简单, 便于大规模生产, 应用广泛。下面简单介绍绝缘栅场效应管的特性。

绝缘栅场效应管分为增强型和耗尽型两类, 每一类又有 N 沟道和 P 沟道之分。现着重介绍 N 沟道增强型绝缘栅场效应管。

一、N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构

图 1-13 (a) 是 N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构示意图。它是以一块杂质浓度较低 P 型硅半导体作衬底, 利用扩散的方法在其上面形成两个高掺杂的 N^+ 区, 并将硅片表

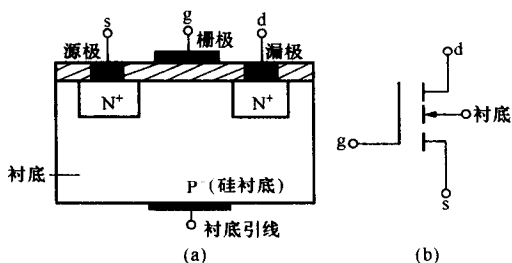


图 1-13 N 沟道增强型绝缘栅场效应管
(a) 结构; (b) 符号

面氧化, 生成一层很薄的二氧化硅绝缘层。再在两个 N^+ 区之间的二氧化硅表面及两个 N^+ 区的表面分别安置三个铝电极: 栅极 g 、源极 s 和漏极 d , 这就构成了 N 沟道增强型绝缘栅场效应管。其图形符号如图 1-13 (b) 所示, 图中箭头方向由 P^- (衬底) 指向 N (沟道)。

由于栅极与源极、漏极及衬底之间是绝缘的, 所以这种管子称为绝缘栅场效应管, 又因这种管子在结构上含有金属 (metal)、氧化物 (oxide) 和半导体 (semiconductor) 材料, 故又称为 MOS 场效应管。

二、工作原理

在场效应管的栅—源极之间加正向电压 U_{GS} , 漏—源极之间加正向电压 U_{DS} , 如图 1-14 所示, 当栅极与源极之间的电压 $U_{GS} = 0$ 时, 漏极和源极之间是两个反向连接的 PN 结, 其中一个 PN 结是反向偏置的, 所以漏极电流 $I_D = 0$ 。

当 $U_{GS} > 0$ 时, 情况则不同了。因栅极与 P^- 型硅片的衬底构成了一个相当于以二氧化硅薄层为介质的平板电容器, 在 U_{GS} 作用下, 介质中产生了一个垂直于衬底表面的电场, 这个电场将 P^- 区的自由电子吸引到靠近栅极表面, 与 P^- 区中的空穴复合, 形成不导电的耗尽层。当 U_{GS} 足够大时, 吸引的电子数足够多, 在耗尽层与二氧化硅薄层之间再形成一层可以导电的电子层, 从而构成了漏极和源极之间的电子 (N 型) 导电沟道。若在漏、源极之间加上 U_{DS} , 就会产生漏极电流 I_D , 即场效应管导通。将开始形成导电沟道的栅源电压称为开启电压, 用 $U_{GS(th)}$ 表示。显然, U_{GS} 越大, 电子层的自由电子浓度越大, 相应的导电沟道越宽, 等效电阻越小, 导电能力就越强, 在同样的 U_{DS} 作用下, I_D 也越大。因此改变栅源电压 U_{GS} 就可以有效地控制漏极电流的大小。可见场效应管是一种电压控制器件。

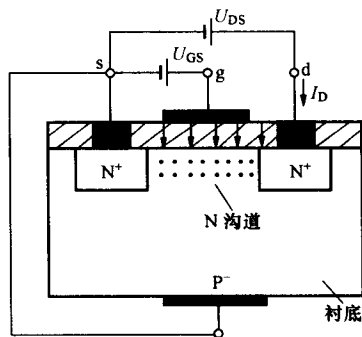


图 1-14 N 沟道增强型 MOS 管的工作原理

由于这种场效应管没有原始导电沟道, 只有当 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 时, 才形成导电沟道, 所以称为增强型场效应管。

为了表示场效应管的栅源电压对漏极电流控制能力的强弱, 通常引入跨导 g_m 来衡量。它定义为: 当漏源电压 U_{DS} 为定值时, 漏极电流的微小变化 ΔI_D 与引起这个变化的栅源电压变化量 ΔU_{GS} 之比, 即

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{常数}}$$

跨导 g_m 相当于三极管的电流放大系数 β 。

至于 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管的结构, 与增强型场效应管相似, 所不同的是, 耗尽型场效应管在制造时就在二氧化硅绝缘层中掺入了大量的正离子 (因为正离子不可移动,

所以二氧化硅仍为绝缘体)。由于正离子的作用,它具有一个原始的导电沟道。即使 $U_{GS}=0$, 只要漏源极之间加上正向电压, 就会产生漏极电流。这样, 这种管子的 U_{GS} 不论是正是负或零都可以控制漏极电流, 使用起来更灵活。N 型沟道耗尽型绝缘栅场效应管的图形符号如图 1-15 所示。

场效应管与三极管相比, 在性能上有许多优点, 因此应用越来越广。这也是我们简介场效应管的原因。因受学时限制, 本书不予展开介绍。

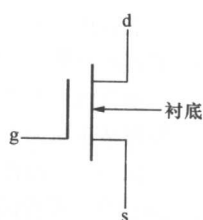


图 1-15 N 型沟道耗尽型绝缘栅场效应管的图形符号

本章小结

(1) 半导体材料是制造各种半导体器件的基础材料, 它具有掺杂、热敏和光敏特性。其内部存在自由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, 少子是自由电子; N 型半导体中, 多子是自由电子, 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, 它的伏安特性曲线反映了二极管的导电特性。二极管的参数是正确选择二极管的依据。

(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) 按三极管的输出特性可以分为三个工作区: 放大区、饱和区和截止区。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: 发射结正向偏置, 集电结反向偏置; 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, 其外部的偏压条件是: 发射结和集电结均正偏。

(6) 场效应管 (MOS 管) 是利用栅源电压来控制导电沟道的宽窄, 从而达到控制漏极电流的目的, 它是电压控制器件。具有输入电阻高, 热稳定性好, 易集成等优点。

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, 即加正向电压时, PN 结_____, 此时正向电阻_____; 加反向电压时, PN 结_____, 此时反向电阻_____。

1-3 当温度升高时, PN 结的反向饱和电流会_____。