

高 职 高 专 规 划 教 材

电 子 技 术

刘继平 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高职高专规划教材

电子技术

主编 刘继平

参编 成叶琴

张思忠

赵 俭

主审 叶俊英



机械工业出版社

本教材是根据机械职业教育基础课教学指导委员会电工及电子技术学科组的决定编写的。

全书分为常用半导体元件、半导体三极管交流放大电路、直接耦合放大电路、直流电源、正弦波振荡器、数字逻辑电路、基本数字部件、传感器及应用电路、功率控制接口技术等九章, 所涉内容新颖, 深浅适度, 文字简洁流畅, 注重工程应用。

本书适合高等职业技术学院、成人高校等非电类专业使用, 可供职业学校选用, 也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术/刘继平主编. —北京: 机械工业出版社,
2002. 8

高职高专规划教材

ISBN 7-111-10759-4

Ⅰ. 电… Ⅱ. 刘… Ⅲ. 电子技术-高等学校: 技
术学校-教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 055859 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 卢若薇 版式设计: 霍永明 责任校对: 张莉娟

封面设计: 陈 沛 责任印制: 闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.5 印张·309 千字

0 001—3 000 册

定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

前 言

为主动适应非电类特别是机械类专业的教学要求,根据机械职业教育基础课教学指导委员会“十五”高职高专教材编审出版计划,按照机械职业教育基础课教学指导委员会电工及电子技术学科组于2001年11月在福建职业技术学院召开的专题会议上的决定而组织编写本套教材的。全套教材分为《电工技术》和《电子技术》两册书,并作为高职高专非电类专业“十五”规划教材。

本套教材是在本学科组组编的《电工学》(丁承浩主编)与《工业电子学》(刘继平主编)两本书的基础上,根据机械职业教育机械类教学指导委员会制订的高职高专非电类专业教学计划和《电工学与工业电子学教学大纲》对本课程的要求而重新编写的,并分别更名。它既适用于工科高职院校作为“现代机械制造”、“数控加工技术”、“机电技术应用”、“汽车制造与维修”、“机械设备维修与管理”、“模具设计与制造”、“金属热处理”、“铸造”、“焊接”等机械类专业的“电工学”、“工业电子学”课程教材使用,又可供其他行业非电类高职专业使用,也可供中专、职工中专机械类专业作为教材选用。

“电子技术”是一门重要的技术基础课,该课程的任务是:培养学生具有高等技术应用性工程技术人员必备的分析基本电子电路的能力,选择和使用电子器件及基本集成电路元件的能力,并具有安装、调试、检测及维修基本电子电路的能力。通过本课程的学习,应使学生了解“电子技术”在机械类各专业中的地位 and 重要性,并提高对其相关专业知识的自学能力,使学生能适应21世纪对新技术、新工艺发展的需要。

为了兼顾本教材对不同专业和不同地区的需要,使本教材有更好的适应性,本书理论部分重点介绍了主要半导体电子器件及二极管整流、三极管放大、直接耦合、集成运算放大器、振荡、数字、传感器、功率接口等基本电路的基本工作原理及分析方法;应用部分注重电子元件、集成电路器件、传感器和接口技术的使用及应用电路实例介绍。

全书的教学时数为85学时,其中基本计划学时为60学时,标注“*”部分的内容为25学时,可根据不同专业灵活掌握,进行取舍。

本教材编写的指导思想是:理论知识以必需、够用为度,突出应用,并精选一些工程实际应用电路作为例子,注重对学生实践应用能力的培养。为此,本教材在原理分析中以定性为主,辅以必要的定量计算。凡本教材引入的公式及重要结论一般均不作详细推导,重点放在讲清它们的物理意义和应用上。

本教材内容安排上力图做到与新产品、新工艺和新技术接轨。为拓宽知识面,增加了高保真集成功率放大器、晶闸管直流电动机调速电路、水塔自动上水电路、荧光数码显示电路、传感器检测及控制电路、电子和电气设备的功率接口电路等内容,但并不因此而增加教材的深度。本教材的文字符号、图形符号、电路画法及标注方法均严格按照中国标准出版社2001年4月出版的《电气简图用图形符号国家标准汇编》的要求执行。

本书第一、二、五、六、七章及附录由湖南工业职业技术学院刘继平编写,第三章由刘继平和上海电机技术高等专科学校成叶琴编写,第四章由刘继平和福建职业技术学院张思忠

编写，第八、九章由深圳市工业学校赵俭编写。全书由刘继平主编，中南大学叶俊英教授担任主审，湖南职业技术学院电气工程系谭耀辉主任担任副主审。

在本书的编写过程中，承蒙福建职业技术学院热情、周到地安排了有关会议，机械工业出版社教材编辑室给予了大力支持，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，本书可能存在不足之处，恳切希望兄弟学校师生和读者批评指正。

编 者

2002 年 6 月

目 录

前言

第一章 常用半导体元件	1	第一节 半导体二极管单相整流电路	76
第一节 半导体的基本特性及PN结	1	第二节 滤波电路	79
第二节 半导体二极管	3	第三节 直流稳压电路	81
第三节 特殊用途的二极管	5	第四节 晶闸管可控整流电路及晶闸管的保护	85
第四节 半导体三极管	8	第五节 晶闸管的触发电路	91
第五节 光电三极管	13	第六节 晶闸管的应用举例	93
第六节 MOS场效应晶体管	13	思考题与习题	96
第七节 晶闸管	17	第五章 正弦波振荡器	98
思考题与习题	19	第一节 正弦波振荡器的基本知识	98
第二章 半导体三极管交流放大电路	21	第二节 LC振荡器	100
第一节 共发射极交流电压放大电路	21	第三节 石英晶体振荡器	103
第二节 放大电路的微变等效电路分析法	27	思考题与习题	106
第三节 负反馈在放大电路中的应用	31	第六章 数字逻辑电路	108
第四节 功率放大电路	37	第一节 脉冲与数字信号	108
第五节 多级放大电路	43	第二节 基本逻辑门电路	109
思考题与习题	44	第三节 集成逻辑门电路	115
第三章 直接耦合放大电路	47	第四节 触发器基本单元电路	118
第一节 直接耦合放大器存在的问题	47	第五节 逻辑门电路的应用举例	123
第二节 差动式放大电路	48	第六节 555定时电路	124
第三节 集成运算放大器的性能和参数	50	思考题与习题	125
第四节 集成运算放大器的线性应用	55	第七章 基本数字部件	127
第五节 运算放大器的非线性应用	65	第一节 二进制数及码制	127
第六节 集成运算放大器的应用举例	68	第二节 集成全加器	129
思考题与习题	70	第三节 计数器	130
第四章 直流电源	76	第四节 寄存器	135
		第五节 译码器	137
		第六节 显示电路	140
		思考题与习题	143
		第八章 传感器及应用技术	144
		第一节 力敏传感器	144
		第二节 温敏传感器	148

·第三节 磁敏传感器	154	B-3 场效应晶体管主要	
第四节 光敏传感器	161	参数	189
第五节 Smart 传感器	166	B-4 晶闸管主要参数	190
思考题与习题	167	附录 C 集成电路型号命名和主要	
第九章 功率控制接口技术	169	参数	190
第一节 功率场效应晶体管的功率		C-1 国产半导体集成电路的	
控制接口	169	型号组成及其意义	190
第二节 晶闸管的功率控制接口	172	C-2 部分国产集成运算放大	
第三节 伺服电动机的控制接口	178	器的主要参数	191
第四节 可调交流电源的功率控制		C-3 三端集成稳压器主要	
接口	182	参数	191
思考题与习题	185	C-4 数字集成电路常用系	
附录	186	列品种代号 (摘录)	192
附录 A 常用半导体器件命名方法	186	附录 D 进口常用半导体器件的主	
附录 B 国产常用半导体器件的		要参数	192
主要参数	187	D-1 常用半导体二极管	192
B-1 常用半导体二极管	187	D-2 常用半导体三极管	193
B-2 常用半导体三极管	189	参考文献	194

第一章 常用半导体元件

常用的半导体材料有硅、锗、硒和砷化镓等，通过特殊工艺可将其制成半导体二极管、三极管、稳压管、晶闸管等元件。这些元件具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长、工作可靠、价格低廉等优点。随着半导体技术的发展，它们的种类繁多，应用日益广泛。本章首先简要介绍半导体的基本知识和PN结的形成，其次介绍常用的几种半导体元件，重点讨论晶体二极管、三极管的特性和主要参数。

第一节 半导体的基本特性及PN结

一、本征半导体

自然界中所有的物质，按照它们的导电特性，可分为导体、绝缘体和半导体三种。半导体的导电性能介于导体与绝缘体之间。通常把没有杂质、结构完整的半导体称为本征半导体。

目前用来制造半导体元件的材料有锗、硅、砷等，它们在结构形式上都是晶体，而在导电性上都是半导体。在电子学中，硅（Si）和锗（Ge）是两种主要的半导体材料，所以常以它们为例说明半导体的导电原理。硅和锗位于元素周期表的第四列，都是四价元素，每个原子最外层的四个价电子分别与相邻原子中的一个价电子组成所谓电子对，这种结构方式称为共价键结构，如图 1-1 所示。由原子理论可知，每个原子的最外层有八个电子属于比较稳定的状态，所以价电子被束缚在原子周围，不易自由移动。因此在常温下，本征半导体中的自由电子浓度很低，导电能力也就很弱。

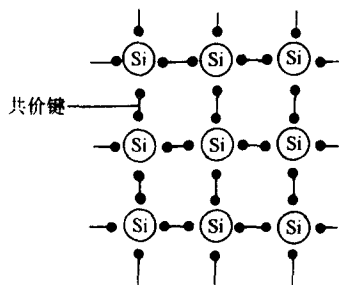


图 1-1 硅单晶的共价键平面图

二、掺杂半导体

为了增强半导体的导电能力，在本征半导体中可人为掺入微量的其他元素，使之成为杂质半导体。按照掺入杂质的不同，可获得 N 型和 P 型掺杂半导体，这两种半导体是制造各种半导体器件的基础材料。

（一）N 型半导体

本征半导体中掺入了微量五价元素如磷（P）、砷（As）、锑（Sb）等时，其平面模型如图 1-2a 所示。以掺入磷为例，磷原子的价电子与相邻的硅原子的价电子组成四对共价键，多余一个电子，它不受共价键束缚，只

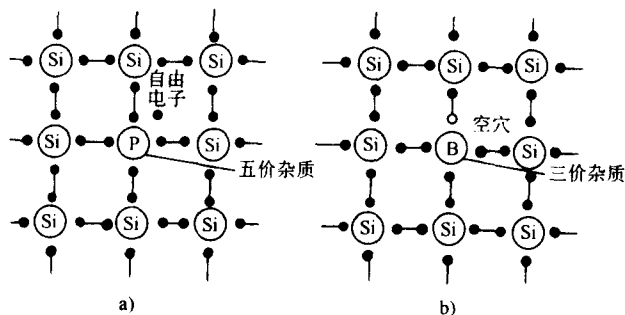


图 1-2 掺杂半导体平面模型

a) N 型半导体 b) P 型半导体

要获得较小的能量便容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。可见掺杂后的半导体提高了自由电子的浓度，其导电能力大大增强。这种杂质半导体主要靠电子导电，故称为电子型半导体，简称N型半导体。

(二) P型半导体

本征半导体中掺入了微量三价元素如硼(B)、镓(Ga)、铟(In)等时，其平面模型如图1-2b所示。以掺入硼为例，硼原子的价电子与相邻的硅原子的价电子只能组成三对共价键，便自然形成一个空位，称为“空穴”，它很容易由相邻的原子中的价电子来填补，从而在相邻的原子上又产生一个新的空穴，形成移动的空穴。显然，掺杂后每个硼原子都能提供一个空穴，从而使杂质半导体的空穴浓度大大提高。这种杂质半导体主要靠空穴导电，故称为空穴型半导体，简称P型半导体。

必须指出，在外电场作用下，半导体中不仅有自由电子定向运动形成的电子电流，还有空穴定向运动形成的空穴电流。它们的区别是电子电流是带负电的电子定向运动，而空穴电流视为是带正电的空穴定向运动，两者的运动方向相反。所以，在半导体中不仅有自由电子这种载流子，还有另一种载流子——空穴，这是半导体导电的一个基本特征。

三、PN结及其单向导电性

PN结是结型半导体器件的基本组成部分。当经过特殊工艺加工，将P型半导体和N型半导体紧密结合在一起时，则在两种半导体的交界处就会形成一个特殊的接触面，称为PN结，如图1-3所示。根据P型区和N型区有效掺杂浓度的不同，相应形成不同的PN结，便可制造出各种不同特点的二极管和其他半导体器件，因此必须了解PN结的特性。通过实验可以证实PN结具有单向导电特性。

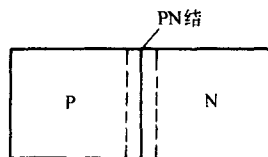


图 1-3 PN 结的内部结构示意图

若在PN结上加以正向电压，即P区接电源正极，N区接电源负极，称PN结处于正向偏置状态。此时信号灯亮，说明电路中正向电流 I_F 较大，PN结为正向导通状态，呈低阻性，相当于开关闭合，如图1-4a所示。而当在PN结上加以反向电压，即N区接电源正极，P区接电源负极（PN结处于反向偏置状态）时信号灯灭，说明电路中反向电流约为零，PN结处于反向截止状态，呈高阻性，相当于开关断开，如图1-4b所示。必须指出，在PN结处于反向偏置的情况下，由于半导体的导电性质所决定，反向电流（又称反向饱和电流）并不等于零。但在常温下，由于反向电流很小，一般可以忽略不计。

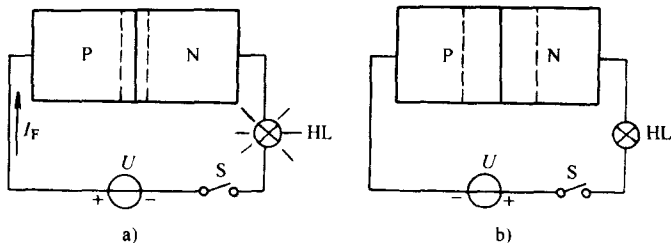


图 1-4 PN 结的单向导电性
a) 加正向电压时导通 b) 加反向电压时截止

由此可见，PN结处于正向偏置时导通，而处于反向偏置时截止，这一特性就称为PN结的单向导电性。

第二节 半导体二极管

一、二极管的结构和分类

半导体二极管 (VD) 就是由一个 PN 结并从它的 P 区和 N 区各引出一个电极, 用管壳封装而成的。常见的几种二极管的外形如图 1-5 所示。

二极管的内部结构及符号如图 1-6 所示。P 区引出线为正极或阳极, N 区引出线为负极或阴极。

二极管的种类很多, 一般可分为以下几类。

(一) 按半导体材料分类

主要有硅和锗两种二极管。硅管的优点是反向电流小、允许工作温度高、击穿电压高及热稳定性能好, 缺点是小信号检波的灵敏度低、线性度差。一般用于整流和逻辑应用等电路中。而锗管的优缺点正好与硅管相反, 多用于检波、高频等电路中。

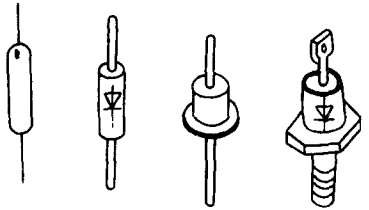


图 1-5 常见二极管的外形图

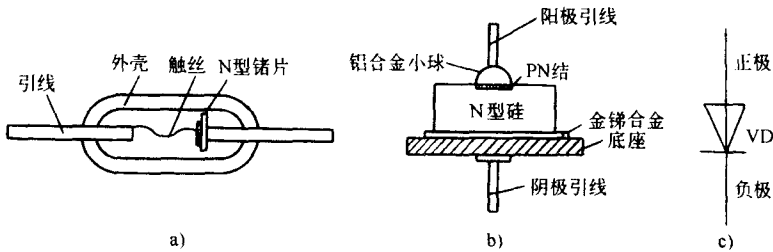


图 1-6 二极管的结构及符号

a) 点接触型内部结构 b) 面接触型内部结构 c) 图形和文字符号

(二) 按结构形式分类

主要有点接触型和面接触型两种二极管。点接触型是由一根金属丝和半导体晶片接触构成 PN 结, 如图 1-6a 所示, 所以 PN 结面积小, 不能通过大电流, 但结间电容小, 工作频率高, 因此它适用于小功率整流、高频检波等电路。而面接触型的 PN 结面积大, 如图 1-6b 所示, 故结电阻小允许通过的电流大, 但结间电容大, 工作频率低, 所以它适用于低频大功率整流电路。

(三) 按用途分类

可分为整流二极管、信号二极管和特殊用途二极管等。

二、二极管的伏安特性

普通二极管最重要的特性就是单向导电性, 这可通过二极管的端电压与通过的电流之间的关系曲线得到进一步的认识。这条关系曲线就叫做伏安特性曲线, 如图 1-7 所示。它可以分

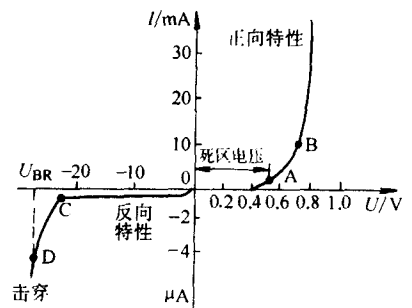


图 1-7 硅二极管的典型伏安特性

为以下三个部分。

(一) 正向特性

在二极管两端加以正向电压,就会产生正向电流。但是,当起始电压很低时,正向电流很小,近似为零,如图 1-7 中的 OA 段所示,管子呈高阻状态。这段区域称为死区,A 点电压称为死区电压,在常温下硅管的死区电压约为 0.5V,锗管约为 0.2V。当二极管两端的电压超过 A 点电压后,管子开始导通,正向电流随端电压的增高而迅速增大,管子呈低阻状态。

从图 1-7 中 B 点以后的特性可以看出,这时二极管的正向电流在相当大的范围内变化,而二极管两端的电压变化却不大(即近似为恒压特性),小功率硅管约为 0.7V,锗管约为 0.3V。上述经验数据通常作为小功率二极管正向工作时两端直流电压的估算值。

(二) 反向特性

在二极管两端加以反向电压时,由于 PN 结的反向电阻很高,所以反向电压在一定范围内变化,反向电流非常小,且基本不随反向电压而变化,如图 1-7 中 OC 段所示,故称这个电流为反向饱和电流(正常情况下可忽略不计),此时管子处于截止状态。

反向电流是二极管的一个重要参数。反向电流愈大,说明管子的单向导电性能愈差。一般来讲,硅管的反向电流约为 $1\mu\text{A}$ 到几十微安,锗管约为几十至几百微安。另外,反向电流随温度的上升而急剧增长,通常,温度每增加 10°C ,其值约增加一倍。

(三) 击穿特性

在图 1-7 中,当过 C 点继续增大反向电压时,反向电流在 D 点处突然上升,这种现象称为反向击穿。发生击穿时的电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。各类二极管的反向击穿电压大小不同,通常为几十到几百伏,甚至高达数千伏。

三、二极管的主要参数

为了适应各种不同用途的要求,参数与型号不同的二极管很多。以整流二极管为例,其主要参数有三个:

(一) 最大整流电流 I_F

指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流值。它主要由 PN 结的面积和散热条件决定。

(二) 最高反向工作电压 U_{RM}

指二极管长期运行时,允许承受的最高反向电压。为了保证管子安全运行,一般最高反向工作电压约为击穿电压的一半。

(三) 最大反向电流 I_{RM}

指在二极管上加最高反向工作电压时的反向电流值。反向电流大,表明管子的单向导电性能差,且受温度的影响大。

除以上参数外,还有二极管的最高工作频率、正向管压降、极间电容、散热器规格等。本书附录 A 为国产半导体器件型号的命名方法。附录 B-1 和 D-1 列出了常用国产及进口半导体二极管的主要参数。这些参数是正确使用半导体二极管的依据。

必须强调,上述各参数都与温度有关。所以只有在规定的散热条件下,才能保证二极管在长期运行中各参数稳定,管子能正常工作。因此,查阅手册选择二极管时,要考虑实际应用中的温度影响,对参数作必要的修正。

第三节 特殊用途的二极管

一般说来,整流、检波及开关电路中的钳位、隔离等用途的二极管,都具有前面所述基本相似的伏安特性,均属于普通型二极管。随着电子工业的迅速发展,为了适应各种不同的要求,许多不同参数与型号的特殊二极管应运而生。它们各自具有其特殊用途所需的特性,有的甚至与普通二极管的伏安特性完全不同。以下介绍几种常用的特殊用途的二极管。

一、稳压管

稳压管(VS)是用特殊工艺制成的面接触型半导体二极管,它的外形与普通二极管相似。由于它是利用反向击穿区作为其工作区,在电路中能起到稳压的作用,故称为稳压管。

稳压管伏安特性及符号如图 1-8 所示,它的正向特性曲线与普通二极管类似,其差异是反向特性曲线比较陡。当反向电压小于 U_{Smin} (反向击穿电压的最小值) 时,反向电流几乎为零。当反向电压等于或略大于 U_{Smin} 时,稳压管就会产生可逆击穿(即当外加电压切断后,PN 结仍能恢复原状,不会因击穿而损坏),反向电流急剧增加。可见 U_{Smin} 增加到 U_{Smax} (反向击穿电压的最大值) 电压变化的幅度远小于对应最小反向电流 I_{Smin} 增加到最大反向电流 I_{Smax} 的电流变化幅度。或者说,击穿后,通过管子的电流在很大范围内变化,而管子两端的电压变化很微小,可近似认为基本不变。利用这一特性,稳压管在电路中就能起稳压作用,而 A~B 段就叫做稳压管的正常工作区域。所以稳压管在电路中一般都是反接使用。

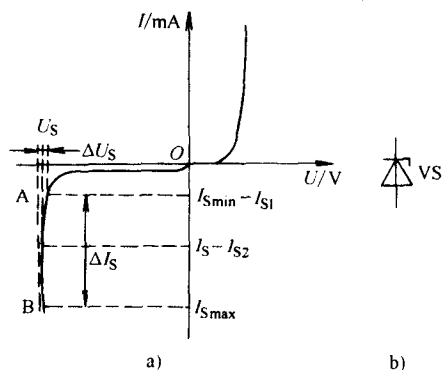


图 1-8 稳压管的伏安特性及符号

a) 伏安特性 b) 图形和文字符号

稳压管的主要用途:在电路中常作为恒压源、辅助电源和基准电源使用,在数字逻辑电路中还常用作电平转移等。

稳压管的主要参数:

(一) 稳定电压 U_S

指稳压管的反向击穿电压。对于同一型号的稳压管,由于制造上的原因,其稳定电压未必为同一数值,而是有一个小的数值范围。使用时要注意选择。

(二) 稳定电流 I_S

指管子在工作时的参考电流值,其值在 I_{Smin} 与 I_{Smax} 之间。当流过管子的电流小于 I_{Smin} 时管子不能起稳压作用,而大于 I_{Smax} 时管子将过热损坏。手册中规定有最小测试电流 I_{S1} 和正常测试电流 I_{S2} 两项,应用时通常取 $I_S = I_{S2}$ 。

(三) 最大耗散功率 P_{Sm}

指管子不至因热击穿而损坏的最大耗散功率。它近似等于稳定电压与最大稳定电流的乘积,即 $P_{Sm} = U_S I_{Smax}$ 。

稳压管的型号命名及主要参数可参看本书附录 A 和附录 B-1。

二、双基极单结型半导体管

双基极单结型半导体管 (VU) 简称单结管。常见的单结管的外形如图 1-9 所示。

单结管的内部结构及符号如图 1-10 所示。它具有一个 PN 结, 从 P 区引出的电极 E 称为发射级, N 区引出的两个电极 B_1 、 B_2 分别称为第一基极和第二基极, 故又称为双基极二极管。

为了便于了解单结管的性能, 可将其等效为图 1-11 点划线框内的电路。二极管表示它的 PN 结, r_{B1} 、 r_{B2} 分别为 PN 结处至两个基极 B_1 、 B_2 之间的体内等效电阻。 E_E 、 E_B 和 R 分别为外接电源和电阻。

第一基极电阻 r_{B1} 的重要特性是它的阻值随着发射极电流 I_E 的大小而变化。当单结管截止时, 发射极电流 I_E 很小, 近似等于零, r_{B1} 呈现高阻状态; 图 1-9 双基极单结型导通时, I_E 增大, r_{B1} 呈现低阻状态。所以在等效电路中, r_{B1} 用可变电阻表示。 半导体管外形图 r_{B2} 则与 I_E 的变化无关。单结管截止时, 两基极之间的电阻 $r_{BB}=r_{B1}+r_{B2}$, 约为 $2\sim 15k\Omega$ 。

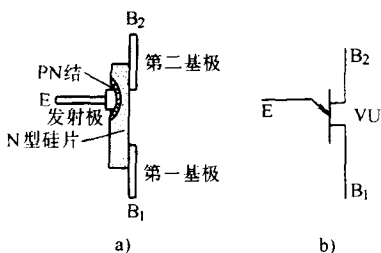


图 1-10 单结管的结构及符号
a) 内部结构 b) 图形和文字符号

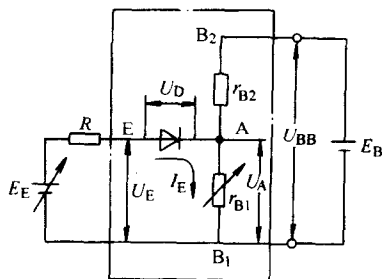


图 1-11 单结管等效电路的
工作原理图

当接上电源 E_B 后, 则 A 点电位为

$$U_A = \frac{r_{B1}}{r_{B1} + r_{B2}} U_{BB} = \eta U_{BB}$$

式中, $\eta = \frac{r_{B1}}{r_{B1} + r_{B2}}$, 称为单结管的分压比, 其数值主要与管子的结构有关, 一般在 $0.3\sim 0.9$ 之间。

分析图 1-11 可知, 单结管的工作特性如下:

适当调节电源 E_E , 当发射极控制电压 $U_E < U_A + U_D$ (U_D 为 PN 结的正向导通电压降) 时, 单结管的 PN 结为反向偏置, 发射极电流 I_E 很小 (为一反向饱和电流), r_{B1} 呈现很大的电阻, 管子处于截止状态。

当 $U_E > U_A + U_D$ 时, PN 结为正向偏置, 管子处于导通状态。此时, r_{B1} 会急剧减小 (由其特性所决定), 而 I_E 显著增加, 在 r_{B1} 中将产生一个较大的脉冲电流, 使单结管由截止突变为导通所需的发射极控制电压称为峰点电压, 用 U_P 表示。显然, $U_P = \eta U_{BB} + U_D$ 。

单结管导通后, 尽管 I_E 增长的幅度较大, 但由于 r_{B1} 下降的幅度更大, 所以 $U_A = I_E r_{B1}$ 的电压值反而下降, A 点电位较低。这时, 即使把控制电压 U_E 调节到低于 U_P , 单结管仍继续导通。直到控制电压 U_E 降到某一值, 使 PN 结再次反偏时, 单结管又将恢复截止状态。单结管由导通突变为截止所需的控制电压称为谷点电压, 用 U_V 表示。

单结管的主要用途: 单结晶体管 and 阻容元件配合, 可以组成弛张振荡器。这种振荡器线

路简单,易于调整,频率调节范围较大,受温度影响小。因此,广泛应用于脉冲发生器、锯齿波发生器、延时电路及晶闸管的触发电路中。

三、发光二极管

发光二极管(VL)是直接把电能转换为光能的电致发光半导体二极管。常见发光二极管的外形、结构及符号如图1-12所示。

发光二极管的基本结构和伏安特性与普通二极管相似,管芯为一个PN结,由透明材料的管壳封装而成,具有正负两个电极。它的正向电阻小,反向电阻大,具有单向导电性。所不同的是,当发光二极管正向导通时,PN结就成为了一个光源,发出可见光,且具有2V左右的较高正向电压,5V左右的较低反向峰值电压。由于它的反向峰值电压低,所以在实际使用时要采取保护措施。

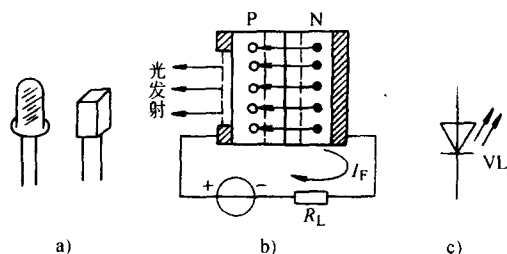


图1-12 发光二极管的外形、结构及符号

a) 外形 b) 内部结构 c) 图形和文字符号

发光二极管有较宽的颜色范围,它发出色光的波长与其PN结的材料和掺杂有关,一般常见的是红、黄、绿三种可见光。此外,还有供光电器件使用、且工作在光谱红外范围(非可见光)的专用发光二极管。

作为显示器件,发光二极管具有体积小、显示快、光度强、寿命长和适应在较恶劣环境下工作等优点。

发光二极管的主要用途:广泛应用于微型计算机、音响设备、数控装置中的显示器。也可将其组成矩阵式或平板式的数码显示器,还可作光电传感器件的发光元件等。

四、光电二极管

光电二极管(VD)是将入射光能转变成电信号的光控半导体器件。常见光电二极管的外形、结构及符号如图1-13所示。

光电二极管的基本结构与普通二极管相似,管芯为一个PN结,都采用透镜罩封装,以便吸收光能实现光控,具有正负两个电极。所不同的是,光电二极管正常工作时处于反向偏置状态,PN结的导通与截止受人射光的控制。光电二极管在反向偏置状态时,其基本工作原理为:

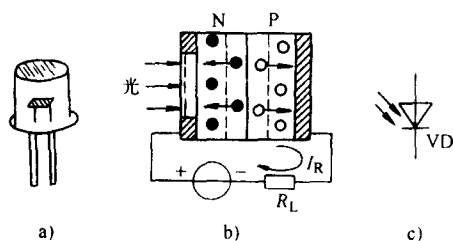


图1-13 光电二极管的外形、结构及符号

a) 外形 b) 内部结构 c) 图形和文字符号

当无入射光照时,仅有很微小的反向饱和电流,这一电流又称为暗电流(可忽略不计),PN结呈现高阻,管子处于截止状态。

当有入射光照时,反向电流增大,这电流称为亮电流。此时,PN结呈现低阻,管子处于导通状态。

正常工作情况下,光电二极管亮电流的大小正比于入射光照的强度,几乎与管子两端反向电压的大小无关,所以它具有相当线性的光照特性。此外它还具有工作速度高、寿命长等优点。

光电二极管的主要用途:广泛应用于光电转换的自动探测、控制装置以及光导纤维通信等系统中作为接收器件。

第四节 半导体三极管

一、三极管的结构

半导体三极管 (VT) 又称晶体三极管, 由两个 PN 结组成, 并采用金属或塑料管壳封装而成。常见三极管的外形如图 1-14 所示。

三极管的内部结构及符号如图 1-15 所示。按结构形式不同, 三极管有 NPN 型管和 PNP 型管, 它们是用不同的掺杂方式制成的。不论是硅管还是锗管, 它们都可制成这两种类型。由图可见, 它们有三个区域, 分别叫基区、集电区、发射区, 相应区域引出的电极分别为基极 B、集电极 C 和发射极 E。基区与发射区之间的 PN 结称为发射结, 而基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。

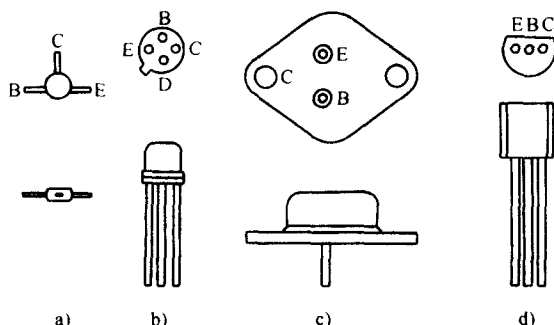


图 1-14 常见三极管的外形图

a) 超小型管 b) 小功率管 c) 大功率管 d) 塑封管

两种型号三极管的图形符号区别在于发射极箭头的方向相反, 箭头方向表示直流电流的实际方向。由于它们的结构形式不同, 所以其放大电路的外接电源连接极性正好相反, 但基本放大原理相同, 故下面以 NPN 型管为例进行分析。

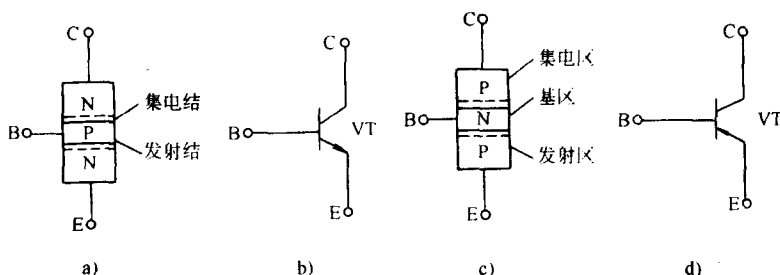


图 1-15 三极管的结构及符号

a) NPN 型管的内部结构 b) NPN 型管的图形和文字符号
c) PNP 型管的内部结构 d) PNP 型管的图形和文字符号

二、三极管的电流分配和放大作用

为定量分析三极管各极电流的分配关系, 加深对三极管电流放大作用的了解, 下面对图 1-16 所示的实验电路进行测量, 所用的三极管为 3DG201 型。

测量方法: 适当调整 R_b , 改变基极电流的大小, 并测得基极电流 I_B 和对应集电极电流 I_C 、发射极电流 I_E 的数据。实测的各组数据如表 1-1 所示。

实验测量结果分析清楚地表明:

1) 各极电流之间的分配关系符合基尔霍夫电流定律 (流进节点的电流之和等于流出节点的电流之和), 即可将三极管视作一个节点, 如图 1-17 所示。则有

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

且 $I_C \gg I_B$, 故

$$I_E \approx I_C \quad (1-2)$$

2) 基极电流的微小变化将引起集电极电流作较大的变化, 即所谓三极管的电流放大作用, 也就是指微小的基极电流对较大的集电极电流的控制作用。通常用电流放大系数来表示三极管的电流放大能力。

直流放大系数 (又称静态放大系数) 为集电极直流电流 I_C 与基极直流电流 I_B 的比值, 用 $\bar{\beta}$ 表示, 即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-3)$$

或

$$I_C = \bar{\beta} I_B \quad (1-4)$$

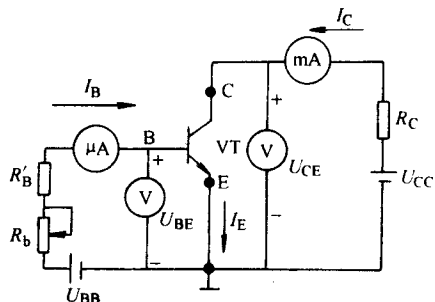


图 1-16 三极管放大实验电路

表 1-1 3DG201 三极管的电流分配关系

电 流 \ 测量次数	1	2	3	4	5
基极电流 $I_B/\mu A$	0	20	40	60	80
集电极电流 I_C/mA	<0.001	0.75	1.50	2.30	3.00
发射极电流 I_E/mA	<0.001	0.77	1.54	2.36	3.08

将表 1-1 中的第 4 组数据代入式 (1-3), 得

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.3mA}{0.06mA} \approx 38.3$$

交流放大系数 (又称动态放大系数) 为集电极电流的变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 的比值, 用 β 表示, 即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-5)$$

将表 1-1 中的第 4 组与第 3 组数据代入式 (1-5), 得

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C4} - I_{C3}}{I_{B4} - I_{B3}} = \frac{(2.3 - 1.5) mA}{(0.06 - 0.04) mA} = 40$$

可见 $\bar{\beta}$ 与 β 的数值较为接近, 因此在实际工程应用中, 常以交流放大系数 β 代替, 它又称为电流放大系数。将 β 代入式 (1-1), 于是得

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \beta) I_B \approx \beta I_B \quad (1-6)$$

必须指出, 三极管的 β 值与所在的工作区域和温度的变化有关, 但在放大区域正常的工作情况下, 可视为一个常数。

3) 三极管所以能起电流放大作用, 首先是它的内部结构条件所决定的, 其次是外部条件成立, 即外电源必须使它的发射结处于正向偏置, 集电结处于反向偏置。

4) 当基极电流 $I_B = 0$ 时, I_C 很微小, 这时集电极电流称为集电极-发射极间的反向饱和电

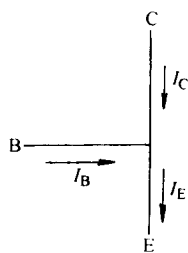


图 1-17 将三极管视为节点的电流分配关系

流,又叫穿透电流,用 I_{CEO} 表示。它是衡量三极管质量的一个重要参数,此值越小,说明管子质量越好。在正常情况下,由于 I_{CEO} 很微小,可忽略不计,所以 $I_C \approx 0$,管子处于截止状态。

上述实验电路是将基极与发射极作为信号输入端,集电极与发射极作为信号输出端,它的特点是输入和输出端均以发射极作为公共端,故称这种电路为共发射极放大电路(简称共射电路)。

必须指出,由于制造工艺的原因,三极管的发射极与集电极不能对调使用。

三、三极管的特性曲线

三极管的伏安特性可以全面地反映其各极间的电压与电流的关系。工程上常用的是输入与输出特性,它直观地表达了三极管的外部特性,对电路分析起到了重要作用。特性曲线一般可在三极管手册上查阅到,也可用三极管特性图示仪直接显示,还可利用如图 1-18 所示的特性曲线测量电路,读出有关数据,再作出如图 1-19 和图 1-20 所示的特性曲线图。

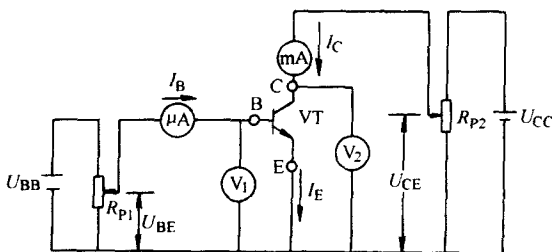


图 1-18 三极管特性曲线测试电路

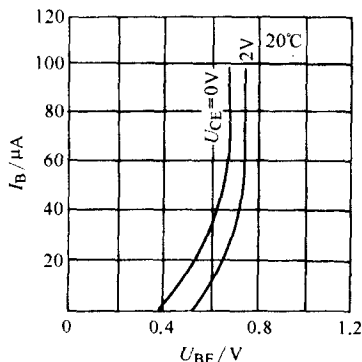


图 1-19 三极管的输入特性曲线

(一) 输入特性曲线

图 1-19 表示集电极电压 U_{CE} 为某一定值时,基极电流 I_B 与基极电压 U_{BE} 之间的关系,即

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

当输入电压 U_{BE} 较小时,基极电流 I_B 很小,通常可以近似为零。当 U_{BE} 大于死区电压后, I_B 开始上升,并基本上按指数规律变化。死区电压的数值,一般硅管约为 0.5V,锗管约为 0.3V。三极管正常导通工作时,硅管的发射结电压 U_{BE} 约为 0.7V,锗管约为 0.3V。

必须指出,当 U_{CE} 增大时,输入特性曲线往右移动,这反映了 U_{CE} 对输入特性的影响。输入特性曲线右移表明,在同样的 U_{BE} 下, I_B 将减小。但当 U_{CE} 大于一定数值(一般 $U_{CE} > 1V$) 后,作出的曲线基本重合。因此只需要测试一条 $U_{CE} > 1V$ (例如 $U_{CE} = 2V$) 的输入特性曲线即可。

(二) 输出特性曲线

图 1-20 表示基极电流 I_B 为某一定值时,集电极电流 I_C 与集电极电压 U_{CE} 之间的关系。即

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

维持基极电流 I_B 为某一固定值(例如 $I_B = 40\mu A$),然后逐渐加大集电极电源电压 U_{CE} ,即

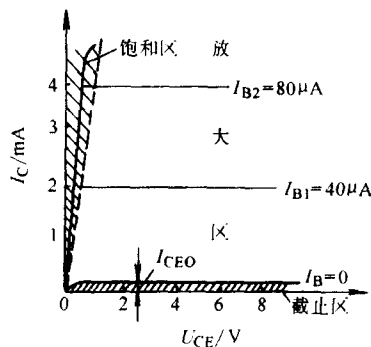


图 1-20 三极管的输出特性曲线