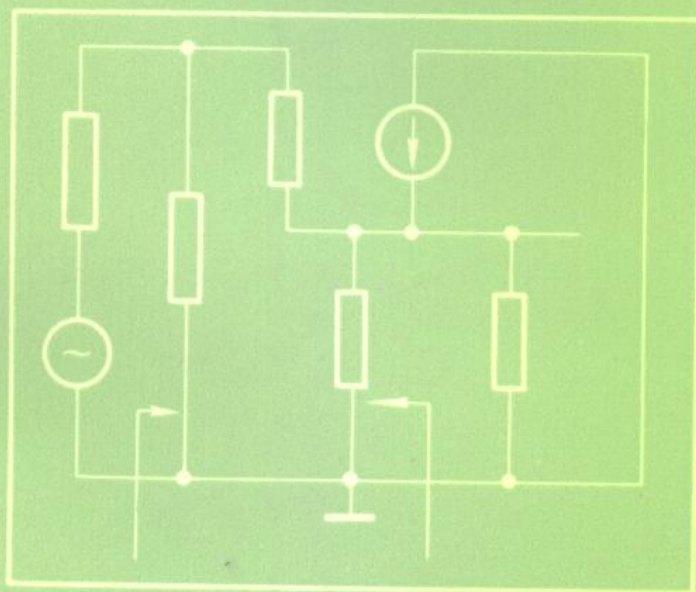
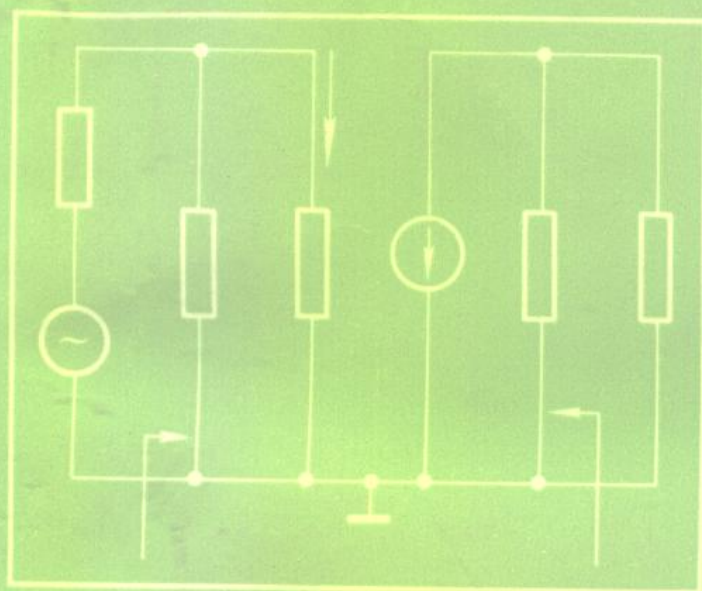


模拟 电子技术

许开君 主编
范振铨



同济大学出版社

模 拟 电 子 技 术

主 编 许开君 范振铨



同 济 大 学 出 版 社

07107/26-24

内 容 提 要

本书共九章,内容包括:晶体管及其基本放大电路,反馈放大电路,场效应管及其基本电路,直流放大器和模拟集成电路,集成运算放大器的应用,正弦波振荡电路,功率放大电路,直流稳压电源,晶闸管电路等。

本书适用于大学本科光学仪器、计量仪器、办公自动化、光电子、应用物理及机电一体化等专业作教材,也适用于职工大学、业余大学和电视大学同类专业作教材,也可供其他有关技术人员学习与参考。

责任编辑:刘式雍 张平官

封面设计:李志云

模 拟 电 子 技 术

主编 许开君 范振铨

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞科技外文印刷厂排版 启东市印刷三厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.75 字数: 454 千字

1991年4月第一版 1991年4月第一次印刷

印数: 1—10500 定价: 6.00元

ISBN 7-5303-0747-X/M·18

前 言

《电路电机技术》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》这套教材是根据精密机械、光学仪器、计量仪器、真空设备与测量,物理探测,应用物理,光电子技术,办公自动化和机电一体化等专业的教学要求编写的,可供有关专业 170 学时教学之用。全套教材由原机械工业部电工学协作组织编写,作为部属院校有关专业的试用教材,填补了上述有关专业教材建设的空白。经十多所高等院校试用四个教学过程,教学效果良好。编者为解决教学需要,对原教材又进行了修订,于 1987 年由宁夏人民出版社出版。

为继续满足教学需要和更好的适应科学技术的发展,编者按照进一步提高起点、精选和更新内容、加强应用的原则,于 1989 年初再次对这套教材进行了改写。

这次改写的《模拟电子技术》教材,除保证了基本概念、基本原理和基本分析方法外,并加强了以集成运放为主的模拟集成电路的功能和应用;编写了自学内容和供选学的参考内容,可供任课教师根据专业特点和学时多少灵活取舍;书中编写了较多的例题、实例、思考题与习题,而且例题、习题与正文内容密切配合,有利于教学;书中的文字符号、图形采用了国家的新标准。

《模拟电子技术》共九章,由陕西机械学院许开君和沈阳工业大学范振铨主编,沈阳工业大学高荣善编写第一章,李忠波编写第二章,范振铨编写第三章,许开君编写第四、五章,陕西机械学院石磊编写第六、七章,夏道智编写第八章,夏道智和王先云编写第九章。

本书由合肥工业大学郎璧云担任主审,西安工业学院沈保成审阅第四、五、六章。参加审稿会的高校有合肥工业大学,西安工业学院,重庆工业管理学院,山东纺织学院,上海机械学院,燕山大学,甘肃工业大学,江苏工学院,杭州电子工业学院,武汉工业管理学院,广西大学,桂林电子工业学院,桂林冶金地质学院,湖北汽车工业学院,海军航空工程学院,沈阳工业大学,陕西机械学院等 17 所院校。参加审稿会的各位代表,提出了不少宝贵意见,使编者在进一步改写时能有所遵循,在此一并向这些同志致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,缺点和错误之处难免,敬请使用本教材的教师和读者给予批评指正。

编 者

1990 年 7 月

目 录

第一章 晶体管及其基本放大电路	1
1-1 PN结与晶体二极管、稳压二极管	1
1-2 晶体三极管	6
1-3 共射极基本放大电路	10
1-4 放大电路的近似估算方法	12
1-5 放大电路的图解分析方法	12
1-6 放大电路的微变等效电路法	17
1-7 稳定静态工作点的共射极典型放大电路	23
1-8 共集电极放大电路	26
*1-9 共基极放大电路	29
1-10 多级放大电路	33
*1-11 晶体三极管混合 π 型微变等效电路和频率特性	36
*1-12 基本放大电路的频率响应特性分析	39
思考题与习题	43
第二章 反馈放大电路	51
2-1 反馈的基本概念	51
2-2 负反馈放大电路的一般表达式	58
2-3 负反馈对放大电路性能的影响	60
2-4 负反馈放大电路的近似估算	65
*2-5 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	69
思考题与习题	75
第三章 场效应管及其基本电路	78
3-1 结型场效应管	78
3-2 绝缘栅场效应管	82
3-3 场效应管的主要参数	85
3-4 VMOS 场效应管	86
3-5 场效应管放大电路	87
3-6 场效应管的应用举例	95
思考题与习题	97
第四章 直流放大器和模拟集成电路	99
4-1 直接耦合放大电路的一般问题	99
4-2 差动放大电路	103
4-3 差动放大电路的传输特性	113
4-4 模拟集成电路	115
4-5 调制型直流放大器简介	120

思考题与习题	122
第五章 集成运算放大器的应用	126
5-1 模拟信号的运算电路	126
5-2 信号处理电路	141
5-3 信号产生电路	154
5-4 信号测量电路	158
*5-5 有源校正电路	161
*5-6 集成运算放大器在实际应用中的一些问题	164
5-7 模拟集成电路应用实例	168
思考题与习题	172
第六章 正弦波振荡电路	179
6-1 概述	179
6-2 RC 正弦波振荡电路	180
6-3 LC 振荡电路	185
6-4 石英晶体振荡电路	189
思考题与习题	192
第七章 功率放大电路	195
7-1 概述	195
7-2 乙类互补对称功率放大电路	197
7-3 甲乙类互补对称功率放大电路	199
7-4 晶体功率管的散热和保护	202
7-5 集成功率放大电路	203
*7-6 VMOS 功率场效应管的功率放大电路	204
思考题与习题	205
第八章 直流稳压电源	207
8-1 单相桥式整流电路	207
*8-2 三相桥式整流电路	209
8-3 滤波电路	212
8-4 稳压管稳压电路	216
8-5 串联式稳压电路	219
8-6 集成稳压电路	222
8-7 三端固定式集成稳压电路的应用	224
*8-8 串联开关型稳压电路	226
思考题与习题	228
第九章 晶闸管电路	232
9-1 晶闸管	232
9-2 单相可控整流电路	236
9-3 晶闸管的保护	244
9-4 单结晶体管触发电路	246

9-5 晶闸管集成触发器.....	251
*9-6 晶闸管逆变电路.....	254
*9-7 晶闸管电路应用举例.....	256
思考题与习题	260

附录

一、半导体器件型号命名方法	262
二、常用半导体器件的参数	263
三、集成电路型号命名	269
四、国内外部分集成运放同类产品型号对照表	270
五、几种国产集成运算放大器参数规范表	270
六、集成功率组件5G31的主要参数.....	272
七、三端式集成稳压器性能参数	272
八、新旧图形符号及文字代号对照表	273

第一章 晶体管及其基本放大电路

本章主要介绍晶体二极管、三极管和共射极、共集电极、共基极三种基本放大电路以及多级放大电路。

对于器件,从PN结的单向导电入手,引出晶体二极管、稳压二极管、三极管的电特性及端口外特性。

对于放大电路,介绍电路组成、工作原理、分析方法,讨论主要性能参数,并分析影响电路性能的因素和改善措施。

1-1 PN结与晶体二极管、稳压二极管

一、PN结及其单向导电特性

众所周知,在元素周期表中第四族元素如硅、锗,其导电性能介于导体和绝缘体之间,叫做半导体。

人们为了有效地利用半导体,通常先制成单晶硅、锗,即完全纯净的半导体,又称做“本征半导体”。常温(27℃)条件下,晶格原子价带上的价电子受到热激发获得一定动能,跳到导带形成带负电荷的自由电子,同时在价电子原来位置留下一个空位,叫空穴。在外加电场作用下,导带中的自由电子,价带中的空穴(邻近能级上的束缚电子会填补这个空位)产生定向运动形成电流。但是本征半导体中自由电子和空穴两种载流子总是成对出现,数量较少。

为了控制半导体导电性能,往往在本征半导体中掺入微量元素。当掺入少量五价元素磷或锑时,在形成共价键后,提供的多余的价电子,几乎都形成自由电子。其中自由电子是多数载流子,而空穴是少数载流子,叫N型半导体。若掺入少量三价元素硼或铟时,形成共价键后,晶体中便产生多余空穴,于是空穴是多数载流子,而自由电子却是少数载流子,叫P型半导体。

上述N型(电子型)和P型(空穴型)半导体,宏观来说正负电荷是相等的,保持电中性。

1、PN结的形成

本征半导体通过掺杂过程,使晶体内部形成P型和N型半导体。在交界面两侧,P区的空穴、N区的自由电子为多数载流子,由于浓度的差异,将分别向对侧扩散,扩散的结果将使P区和N区的原来电中性条件被破坏,N区扩散到P区的自由电子,可能与空穴复合,使自由电子和空穴同时消失;反之P区扩散到N区的空穴与自由电子复合。这样,P区失去空穴留下不能移动的带负电的离子;N区失去自由电子,留下带正电的离子,于是在交界面的两侧分别形成不能移动的带负、正电荷的区域,这是很薄的空间电荷区,如图1-1所示。正、负电荷区建立一个电场,其方向从N区指向P区。这是由于载流子浓度差异扩散运动形成的,叫内建电场。随着扩散运动的进行,内建电场增加,内建电场将阻碍多数载流子的扩散运动。

但是,这个内建电场的方向将使少数载流子(P区的自由电子、N区的空穴)产生漂移运动。因此,在P区和N区交界面产生多数载流子的扩散和少数载流子的漂移,开始扩散大于

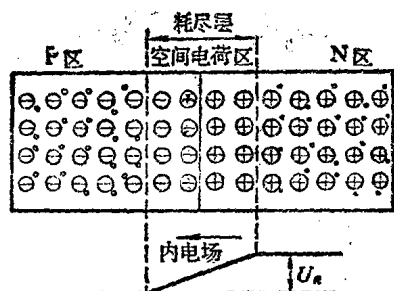


图 1-1 动态平衡状态下的 PN 结

漂移,随着空间电荷区的逐渐加厚,内建电场增强,又使扩散减弱,漂移增强,最后扩散和漂移运动相等时,便处于动态平衡,空间电荷区形成稳定状态,叫做 PN 结。厚度一般为十几 μm 。PN 结又称阻挡层。

因为多数载流子的扩散电流与少数载流子漂移电流大小相等、方向相反,相互抵消,外部宏观不显示电流现象。即没有外加电场或其他激发因素作用时,PN 结没有电流通过。

2、PN 结单向导电特性

那么 PN 结在外加电压作用下,呈现什么特性呢?通过实验不难回答这个问题。

如果外加电压使 N 区电位高于 P 区电位,PN 结为反向偏置。这时外加电场方向与 PN 结的内建电场方向相同,多数载流子的扩散运动被显著阻碍。空间电荷区增加,PN 结加厚,多数载流子扩散电流明显的减弱;而少数载流子的漂移电流基本不变。这是因为少数载流子的浓度只决定于温度。当外加反向电压不是过大、温度不变时,少数载流子的浓度基本不变。通过 PN 结的电流将主要是漂移电流,这一电流的大小与外加反向电压基本无关,方向由 N 区流入 P 区,常称反向饱和电流,其值较小,往往略而不计。PN 结在反向偏置时,不导通,相当于截止,PN 结电阻率极大,反偏电压几乎全部降落在 PN 结上。

当外加电压使 P 区电位高于 N 区时,即电源的正极接 P 区,负极接 N 区,叫正向偏置。这时外电场方向与 PN 结的内建电场方向相反,PN 结空间电荷区变窄,有利于多数载流子扩散,于是多数载流子的扩散电流大增,远远超过少数载流子的漂移电流。通过 PN 结的电流主要是扩散电流,而且随外加正向偏压的增加显著增加,电流方向由 P 区流向 N 区,称做 PN 结导通,PN 结电阻率很小。

由上述分析可知,PN 结正向偏置,PN 结导通,流过正向电流,PN 结反向偏置,则截止,这就是 PN 结的单向导电特性。

二、晶体二极管

晶体二极管是由 PN 结加上欧姆接触电极,两端引出线,管壳封装制成。接在 P 区的引出线叫阳极 A,接在 N 区引出线叫阴极 K,规定文字符号 V_D ,图形符号,  箭头方向表示正向电流方向。

晶体二极管通常有点接触型二极管、面接触型二极管、硅平面开关管等几种类型。

1、二极管的伏安特性曲线

二极管的管压降 U_D 与其电流 I_D 的关系曲线,叫做二极管的伏安特性曲线。可用实验方法测出,也可用图示仪 JT-1 测之。在直角坐标系中横坐标轴表示二极管管压降 $U_D(\text{V})$,纵坐标轴表示电流 $I_D(\text{mA})$,如图 1-2(a)、(b)所示。

从伏安特性曲线上可得出如下规律:

(1) 正向特性

二极管正向偏置,在坐标的第一象限。它又可分为两段:从坐标原点 O 到 a 点为第一

段,二极管外加正向电压较小,外部电场不足以克服内建电场对载流子扩散运动造成的阻力,此时正向电流很小,呈现电阻较大。这段区域称为“死区”。对应 a 点的门坎电压 U_T 叫“死区电压”,其数值大小随二极管的结构材料不同而异,并受环境温度影响。一般来说,硅二极管“死区电压”约为 0.5 V ,锗二极管为 0.1 V 。

正向电压超过门坎电压 U_T 后,随着正向电压的增加,内建电场大大削弱,有利于扩散,电流按指数曲线规律迅速增长。但正向电压在小范围内变化,其电流变化很大。通常硅管电压变化为 $0.6\text{—}0.8\text{ V}$; 锗管为 $0.2\text{—}0.4\text{ V}$ 。

(2) 反向特性

二极管反向偏置,在坐标第三象限。

因为加的反向电压,漂移运动起主要作用,反向电流几乎不变,叫反向饱和电流。其大小对于硅管小于 $0.1\text{ }\mu\text{A}$, 锗管在十几 μA , 并且随着温度升高,反向饱和电流明显增加。

当反向电压超过一定数值后,反向电流急剧增大,这时二极管被“反向击穿”,对应的电压叫做“反向击穿电压” U_{BR} 。使用二极管时,应避免反向电压超过击穿电压,防止损坏二极管。

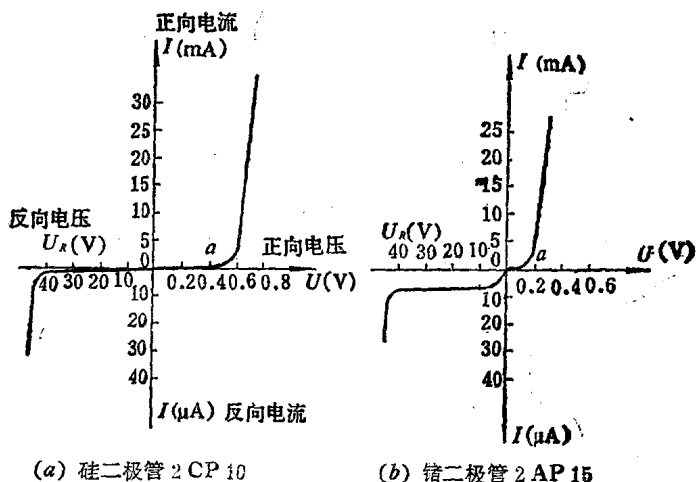


图 1-2 二极管伏安特性

2、二极管的伏安方程

二极管特性实际上是 PN 结特性,按照载流子运动统计规律,其伏安方程为:

$$I = I_{SR} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = I_{SR} \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

其中 $U_T = \frac{kT}{q}$ 叫温度电压当量;

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}^\circ$, 是波尔兹曼常数;

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 是电子所带电量值;

T 是绝对温度(单位 K°);

在常温(300 K°)情况下, $U_T = 26\text{ mV}$;

I_{SR} 是反向饱和电流;

I 是二极管的电流;

U 是二极管两端的电压降 (V)。

下面用伏安方程解释伏安特性曲线。

当二极管承受反向偏置电压, U 为负值, 若 $|U| \gg 0.026 \text{ V}$ 时, 有 $e^{\frac{U}{U_T}} \approx 0$

那么

$$I = -I_{SR} \quad (1-2)$$

式(1-2)中 I_{SR} 就是反向饱和电流值, 前面的负号表明二极管电流为反向。典型值硅管约为纳安(nA , 10^{-9} A)量级; 锗管为微安(μA , 10^{-6} A)量级。

若二极管承受正向偏压时, 通常 $U \gg 0.026 \text{ V}$, 有 $e^{\frac{U}{U_T}} \gg 1$, 则:

$$I = I_{SR} e^{\frac{U}{U_T}} \quad (1-3)$$

这就是二极管电流随正向偏压按指数规律上升的规律。由于在门坎电压附近, PN 结厚度受影响很小, 因参加运动载流子数量相对较少, 其统计规律的方程不适用。

式(1-1)只有在二极管两端电压不过小, 也不过大时才能比较准确表征其伏安特性曲线。

3、二极管的主要参数

结合二极管的伏安特性曲线, 不难引出如下主要参数。

(1) 直流参数

① 最大整流电流 I_{FM}

指管子长期工作时, 允许通过的最大正向平均电流。因为流过电流太大时, PN 结的管压降要引起发热, 超过一定限值要烧坏 PN 结。

② 反向电流 I_R

指在一定环境温度条件下, 二极管承受反向工作电压、又没有反向击穿时, 其反向电流的值。它的值愈小, 表明管子的单向导电特性愈好。温度对反向电流影响较大, 使用时应加注意。

③ 反向最大工作电压 U_{RM}

指管子运行时允许承受的最大反向电压。通常取反向击穿电压 U_{BR} 的 $1/2$ 或 $2/3$ 。

④ 直流电阻 R_D

指二极管两端所加的直流电压与流过它的直流电流之比。阻值与工作点有关。良好的二极管正向电阻等于几十 Ω 到几 $\text{k}\Omega$; 反向电阻大于几十 $\text{k}\Omega$ 到几百 $\text{k}\Omega$ 。

(2) 二极管的动态微变参数

① 二极管的动态微变电阻 R_d

二极管在小信号工作情况下, 用动态微变电阻(又叫交流电阻) R_d 描述。

它的定义是: 在二极管伏安特性曲线工作点附近, 变化电压与相应变化电流之比, 取其极限。相当于过工作点的切线斜率的倒数。

$$R_d = \lim_{\Delta i_d \rightarrow 0} \frac{\Delta u_d}{\Delta i_d} = \frac{du}{di} = \frac{1}{\text{tg} \alpha} \quad (1-4)$$

可见微变电阻与工作点有关。当正向电流较大时, 因为伏安特性曲线近似直线, 各点斜率近似相等, 故 R_d 几乎不变, 但数值很小。

从特性方程可求出:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_d} &= \frac{dI}{dU} = \frac{d}{dU} [I_{SR}(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)] \\ &= \frac{I_{SR} e^{\frac{U}{U_T}}}{U_T} = \frac{I_Q}{U_T} \end{aligned}$$

∴

$$R_d = \frac{U_T}{I_Q} = \frac{26(\text{mV})}{I_Q} \quad (1-5)$$

例如 $I_Q = 2 \text{ mA}$ 时, $R_d = \frac{26}{2} = 13 \Omega$ 。

② 二极管的极间电容

二极管实际是个 PN 结, 空间电荷区相当于电介质, P 区和 N 区相当金属极板, 因此类似平行板电容器。PN 结两侧空间电荷改变, 存在一个结势垒电容, 其值 $0.5 \text{ pF} \sim 100 \text{ pF}$ 。反向偏置时, 因为二极管反向电阻较大, 则结势垒电容作用显得突出。

二极管正向偏压时, 由于多数载流子扩散到对侧形成电荷堆积而构成的扩散电容, 其值在 0.1 pF 至几十 pF 。结势垒电容与扩散电容之和称为极间电容。由于极间电容值较小, 在低频工作时可略去, 但在高频工作时, 必须考虑其影响。

4、二极管的应用与等效电路模型

因为二极管具有单向导电特性, 而且正向偏压导通时管压降, 硅管平均为 0.7 V ; 锗管平均 0.3 V 。反向偏压相当于截止。所以理想二极管电路模型:

正偏压时 $I > 0, U \approx 0$ 相当于短路,

反偏压时 $I \approx 0, U < 0$ 相当于开路。

二极管可用来整流、检波、限幅和箝位等。见本章习题 1-4, 1-5 以及后面的整流电路有关章节。

三、稳压二极管

硅稳压二极管简称稳压管, 它是一种特殊的二极管, 具有稳定电压的特点。

1、稳压管的伏安特性

通过实验测得稳压管伏安特性曲线如图 1-3 所示。

从特性曲线看到, 稳压管正向偏压时, 其特性和普通二极管一样; 反向偏压时, 开始一段和二极管一样, 当反向电压大到一定数值以后, 反向电流突然上升, 而且电流在一定范围 ($I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$) 内增长时, 管两端电压只有少许增加, 这种“反向击穿”是可恢复的, 只要外电路限流电阻保证电流在限制范围内, 不致引起热击穿损坏稳压管。

稳压管的符号:

2、稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z

指稳压管在正常工作时管子的端电压。一般 $3 \text{ V} \sim 25 \text{ V}$, 高的可达 200 V 。

(2) 稳定电流 I_Z

稳压管正常工作时的参考电流。开始稳压时的对应电流叫最小稳压电流 $I_{Z\min}$; 对应额定功耗时的稳压电流叫最大稳压电流 $I_{Z\max}$ 。正常工作电流 I_Z 取其 $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$ 间某个值。

(3) 动态电阻 R_Z

稳压管端电压的变化量 ΔU_Z 与相应电流变化量 ΔI_Z 之比, 叫稳压管的交流动态电阻

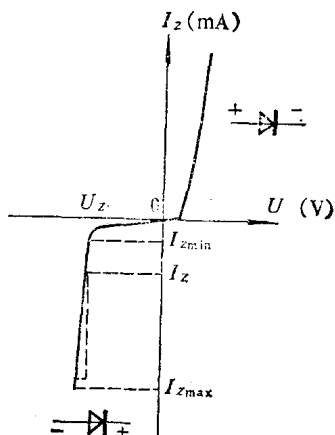


图 1-3 稳压二极管伏安特性

R_z 。

即

$$R_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (1-6)$$

其值在几 Ω 到十几 Ω 。

(4) 稳定电压的温度系数

指稳压管的稳压值 U_z 随工作温度变化影响的系数。例如 2CW17 的电压温度系数为 $+0.09\%/^{\circ}\text{C}$ ，并且有个规律：稳压值低于 6V 的稳压管，电压温度系数为负（表现齐纳击穿）；高于 6V 的稳压管，系数为正（表现雪崩击穿）；而 6V 左右的管子（呈现两种击穿），稳压值受温度影响较小。

(5) 稳压管额定功耗 P_{zM}

保证稳压管安全工作所允许的最大功率损耗。

$$P_{zM} = U_z \cdot I_{z\max} \quad (1-7)$$

1-2 晶体三极管

一、晶体三极管的构造和工作原理

晶体三极管又叫半导体三极管，简称三极管。

1、三极管的构造

在纯净的半导体基片上，按生产工艺扩散掺杂制成两个紧密相关的 PN 结，分三个区，引出三个电极，封装在金属或塑料外壳内，如图 1-4 所示。夹在两个 PN 结中间的区域叫基区，它的特点是掺杂浓度较小、很薄，约几 μm 到十几 μm 。由基区引出的电极叫基极，文字符号记做 B 或 b 。基区两侧分别是发射区和集电区。与基区接触面积较小，且掺杂浓度较大（高掺杂）的区域，叫发射区。引出电极叫发射极，记做 E 或 e 。另一侧是掺杂浓度较小，接触面较大的区域叫集电区，相应的引出线叫集电极，记做 C 或 c 。集电区与基区间的 PN 结叫集电结，发射区与基区间的 PN 结叫发射结。

按掺杂方式不同制成的三极管分为 NPN 型和 PNP 型两种；由于基片材料选取硅或锗不同可分为硅三极管和锗三极管；按其工作频率可分为低频、高频、超高频三极管；按额定功率不同分为小功率、中功率、大功率三极管等。

三极管的电路符号见图 1-4。其中带箭头的电极是发射极，箭头方向指示三极管工作时实际的电流方向。

2、三极管的工作原理

三极管与外电路连接后，并满足一定条件时，才能谈及工作原理。图 1-5 电路是以 NPN 型硅三极管接成共发射极形式的示意图。

现在外电路提供给三极管的条件是：电源 E_B 通过电阻 R_B 提供给发射结正向偏置电压；而电源 E_C 通过电阻 R_C 加到集电极，因为 $E_C > E_B$ ，于是提供给集电极电位高于基极电位，使集电结处于反向偏置。在这种外部条件下，三极管内的载流子在外电场作用下产生定向运动，形成图中箭头方向所示的基极电流 I_B ，集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 。那么，三个电流是

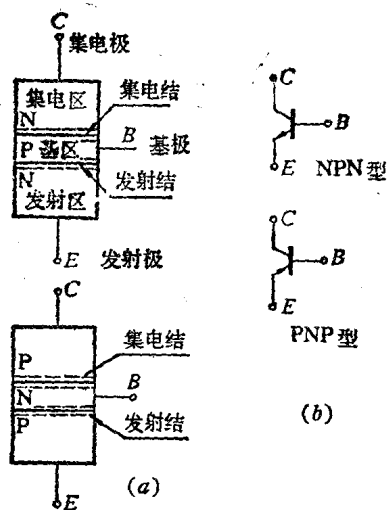


图 1-4 三极管的结构示意图和符号

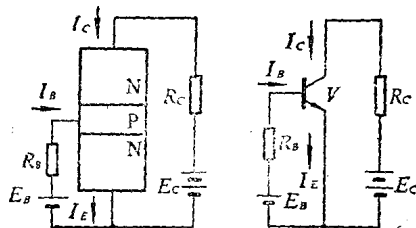


图 1-5 NPN 型三极管共发射极电路示意图

怎样形成的？相互间有什么内在联系？明确了这个工作原理也就清楚了。

由于发射结正向偏置，基区低掺杂，发射区高掺杂，载流子浓度差别很大，于是发射区的多数载流子自由电子在正向偏置电压作用下，有利于扩散，即发射区向基区注入大量自由电子。扩散到基区的自由电子，在基区将发生复合和继续扩散。基区做的很薄，同时又是低掺杂，所以从发射区注入过来的自由电子仅有少量与基区的空穴复合，形成基极电流 I_B ，其余大多数继续扩散，因集电结反向偏置，有利于收集由基区来的大量自由电子，被集电极收集的电子与集电区空穴复合，形成集电极电流 I_C 。

由此看到，发射极起注入载流子的作用；基极起传送和控制载流子的作用；集电极则起收集载流子的作用。

按照载流子运动形成的基极电流 I_B 显然小于集电极电流 I_C ，发射极电流 I_E 一定等于 I_B 与 I_C 之和，即

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-8)$$

当考虑少数载流子漂移运动的作用影响后，其中集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 有如下关系^①：

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} = \beta I_B + I_{CEO} \quad (1-9)$$

式中 β 是共射电流放大系数。 I_{CBO} 是集电结反向饱和电流。

由上述可知，晶体三极管当发射结正偏压、集电结反偏压时，三极管具有电流放大作用，电流放大系数

$$\beta = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad (1-10)$$

式中 $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ ，叫穿透电流。因此三极管可看成是电流控制器件。由于参加导电的有多数载流子和少数载流子，又叫双极型三极管。

至于 PNP 型三极管，只是注入载流子为空穴，电流方向相反，分析方法相似。

① 参看虞华光主编《电子技术基础》第二版上册 49~50 页，高等教育出版社。

二、晶体三极管的伏安特性曲线

三极管有三个电极,以哪一个电极为其公共端,就对应应有相应的伏安特性曲线。这里我们主要介绍以发射极为公共端,即共射组态的伏安曲线。晶体三极管是两端口的非线性器件,如图 1-6 所示。

把三极管插入图示仪 JT-1 中可测其特性曲线。

1、输入伏安特性曲线

当集电极与发射极间的电压 u_{CE} 为某一常数值时,三极管的基极与发射极间电压 u_{BE} 改变对基极电流 i_B 的影响的关系曲线,叫输入特性曲线。

$$i_B = f(u_{BE}) |_{u_{CE}=\text{常数}} \quad (1-11)$$

具体的输入特性曲线如图 1-7 所示。

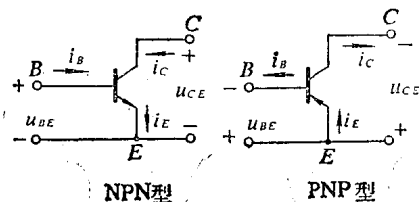


图 1-6 NPN 和 PNP 三极管两端口电路

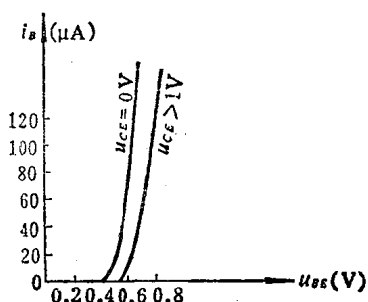


图 1-7 NPN 三极管 3 DG 6 的输入特性曲线

从输入特性曲线上看到:

(1) 三极管的输入特性与二极管的正向特性相似。但由于存在集电极与发射极间压降 u_{CE} 的影响,输入特性曲线通常以两条典型曲线代表:一条对应 $u_{CE} = 0 \text{ V}$;另一条对应 $u_{CE} > 1 \text{ V}$ 。前一条相当于二极管正向特性;后一条曲线,因为 $u_{CE} > 0$,随着 u_{CE} 增大曲线将逐渐向右移动。当 u_{CE} 增至大于 1 V 后,由于发射区注入到基区的多数载流子绝大部分被吸引到集电区,只要保持 u_{BE} 不变,即使 u_{CE} 再增大, i_B 基本不再变化。

(2) 同样存在一个“死区电压”,硅管 $u_{BE} < 0.5 \text{ V}$ 、锗管 $u_{BE} < 0.1 \text{ V}$ 时, $i_B = 0$;并且 i_B 在较宽的数值范围内,对应 u_{BE} 近于一个常数,即硅管 $u_{BE} = 0.6 \sim 0.7 \text{ V}$;锗管 $u_{BE} = 0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。在直角坐标中以实际电流和电压方向来说, NPN 型管在第一象限, PNP 型管在第三象限。

2、输出特性曲线

由图 1-8 可知,用函数关系表示:

$$i_C = f(u_{CE}) |_{i_B=\text{常数}} \quad (1-12)$$

它表征当基极电流 i_B 为参变量、并取某一定值时,集电极电流 i_C 随集电极-发射极间管压降 u_{CE} 变化的曲线。给定一个基极电流 i_B ,就对应一条 i_C 曲线,整体是个曲线族。NPN 三极管 3 DG 6 输出特性如图 1-8 所示。

从输出特性曲线上看到,大致分三个区域。

(1) 截止区

它对应 $i_B = 0$ 那条输出特性曲线以下的区域。对于硅三极管 $u_{BE} < 0.5 \text{ V}$, 锗管 $u_{BE} <$

0.1 V, 可认为 $i_B = 0$, 但为了可靠截止, 通常取发射结零偏压或反偏压。因此截止区的外部条件是发射结反偏压, 集电结反偏压。特点是 $i_B = 0, i_C = I_{CEO}, u_{CE} \approx E_C$ 。

(2) 饱和区

当 $u_{CE} < 1$ V, i_C 随 u_{CE} 增加直线上升变化。在该区域内, $u_{BE} > u_{CE}$, 即硅管 $u_{CE} \leq 0.7$ V, 锗管 $u_{CE} \leq 0.3$ V。饱和的外部条件是发射结正向偏置、集电结也正向偏置。特点是 $i_C \approx \beta i_B$, 在深度饱和时小功率硅管的饱和压降 $u_{CES} \approx 0.3$ V, 锗管 $u_{CES} \approx 0.1$ V。

(3) 放大区

对于硅管 0.7 V $< u_{CE} < E_C$, 锗管 0.3 V $< u_{CE} < E_C$, 对应输出特性曲线的平坦部分, 其特征是 i_C 由 i_B 决定, 满足 $i_C = \beta i_B$, 与 u_{CE} 关系不大, 具有恒流特性。因此, 可以把三极管看成是一个电流控制器件。放大的外部条件是发射结正向偏置、集电结反向偏置。

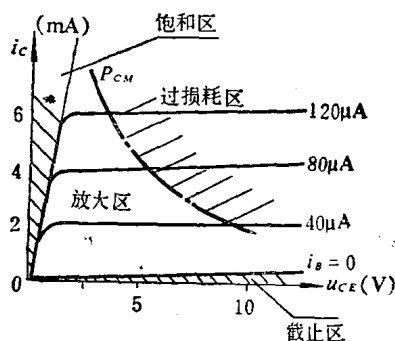


图 1-8 NPN 三极管 3DG6 输出特性曲线

三、晶体三极管的主要参数

1. 电流放大系数

共发射极接法的电流放大系数:

(1) 直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad (1-13)$$

(2) 动态交流电流放大系数

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}} = \frac{(\bar{\beta} I_{B2} + I_{CEO}) - (\bar{\beta} I_{B1} + I_{CEO})}{I_{B2} - I_{B1}} \\ &\approx \frac{\bar{\beta}(I_{B2} - I_{B1})}{I_{B2} - I_{B1}} = \bar{\beta} \end{aligned} \quad (1-14)$$

因此, 当 $\bar{\beta}, I_{CEO}$ 不变时, $\beta = \bar{\beta}$ 。所以今后应用 β 与 $\bar{\beta}$ 认为是同一值。一般 β 为 20~150。

附带说明共基极接法的电流放大系数同样有 $\alpha = \bar{\alpha}$ 。 α 值一般为 0.95~0.995。同时有

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1-15)$$

或

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (1-16)$$

2. 极间反向电流

(1) 集电结反向饱和电流 I_{CBO}

指发射极开路, 集电结反偏时流过集电结的反向饱和电流 I_{CBO} 。对于小功率的硅管 I_{CBO} 一般在 0.1 μ A 以下; 锗管 I_{CBO} 在几 μ A 至十几 μ A。

(2) 穿透电流 I_{CEO}

指基极开路, 从集电极穿透过来流入发射极的电流为穿透电流。在输出特性曲线上, 它对

应 $i_B = 0$ 时, 曲线对应的 $i_C = I_{CEO}$ 。与集电结反向饱和电流 I_{CBO} 有如下关系:

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO} \quad (1-17)$$

它是衡量三极管质量好坏的重要参数, 其值愈小愈好。

3. 极限参数

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM}

当 I_C 过大时, 电流放大系数 β 将下降, 使 β 下降至正常值的 $2/3$ 时的 I_C 值, 定义为集电极最大允许电流 I_{CM} 。

(2) 反向击穿电压

当集电极开路时, 发射极-基极间的反向击穿电压 BU_{EBO} , 一般 5 V 左右。

当发射极开路时, 集电极-基极间的反向击穿电压 BU_{CBO} , 一般在几十 V 以上。

当基极开路时, 集电极-发射极间的反向击穿电压 BU_{CEO} , 通常比 BU_{CBO} 小些。

(3) 集电极最大允许功率损耗 P_{CM}

$$P_{CM} = i_C \cdot u_{CE} \quad (1-18)$$

集电结耗散功率若超过 P_{CM} 值, 集电结过热, 使管子性能变坏或烧毁。

式(1-18)在图 1-8 输出特性曲线上是条双曲线, 叫集电极允许功率损耗曲线。当 $i_C \cdot u_{CE} > P_{CM}$, 在 P_{CM} 曲线的右上方, 称做功率过损耗区; 当 $i_C \cdot u_{CE} < P_{CM}$, 在 P_{CM} 曲线的左下方是三极管功率损耗安全工作区。

四、晶体三极管参数与温度的关系

环境温度变化时, 对三极管的参数 I_{CBO} , U_{BE} , β 均有影响。

1. 温度变化对集电结反向饱和电流 I_{CBO} 的影响。

实验表明 I_{CBO} 与温度 $T^\circ\text{C}$ 成指数关系。一般经验值是: 温度每增加 10°C , I_{CBO} 增大一倍。显然穿透电流 I_{CEO} 受温度影响更明显了。通常硅管优于锗管。

2. 发射结压降 U_{BE} 受温度变化的影响

实验结果表明, U_{BE} 的温度系数为 $-(2-2.5)\text{mV}/^\circ\text{C}$, 即温度升高, 发射结电压 U_{BE} 将减小, 有负的温度系数。

3. 电流放大系数 β 受温度变化的影响

实验表明, 电流放大系数 β 随温度的升高而增大。温度每升高 1°C , β 增加 $0.5\% - 1.0\%$ 。

总之, 掌握二极管、稳压二极管、三极管的有关参数, 以及这些参数随温度变化的关系, 是正确运用半导体器件的关键。同时也是灵活应用这些器件的基本功。要结合特性曲线来理解其参数。

1-3 共射极基本放大电路

放大电路主要是利用三极管的电流控制作用把微弱的电信号增强的到所要求的数值。例如扩音机就是把话筒送来的微弱电信号, 经过放大电路, 把电源供给的能量转换为较强的电信号, 推动扬声器还原成较大的声音。

这里主要介绍共发射极放大电路, 其他两种组态电路在后续有关章节内介绍。