

高等学校教材

模拟电子技术

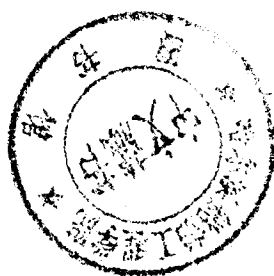
■ 许开君 李忠波 主编

机械工业出版社

高等学校教材

模 拟 电 子 技 术

主 编 许开君 李忠波
参 编 李炳彦 高荣善
孙 强 王先云
主 审 郎璧云



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本书内容包括:晶体管及其基本放大电路,场效应管及其基本放大电路,直接耦合放大器和模拟集成电路,集成运算放大器模拟信号的运算电路,集成运算放大器的其它应用电路,负反馈放大电路,正弦波振荡电路,功率放大电路,直流稳压电源,晶闸管电路,应用实例等。全书各章后附有习题,节后有思考题、例题和实例较多,并给出了系统方面的应用实例,理论密切联系实际。

本书可作为高等学校的精密仪器、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、电子精密机械、办公自动化和机电一体化等专业模拟电子技术课程的教材;也适用于职工大学、业余大学和电视大学同类专业作教材;也可供有关工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/许开君 李忠波 主编. —北京:机械工业出版社 1994. 6

ISBN 7-111-04075-9

I. 模…

II. ①许… ②李…

III. ①模拟电路-电子技术 ②电子技术-模拟电路

IV. TN01

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:胡金瑛 责任校对:张晓蓉

封面设计:郭景云 责任印制:卢子祥

蓝地公司激光照排

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年6月第1版 1994年6月第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·19印张·463·千字

0 001—8 500册

定价:15.00元

前 言

《电路与电机技术》、《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。这套教材由机械工业部部属高等学校电工学课程协作组织编写,作为部属高等学校有关专业的试用教材,它填补了我国上述有关专业教材建设的空白。

这套教材已经过 10 多所高等学校试用了四个教学过程,效果良好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,在总结多年教学和教材建设经验的基础上,对本教材又重新进行了编写。

本书除了保证基本概念、基本原理和基本分析方法的内容之外,加强了以集成运算放大器为主的模拟集成电路的内容,加强了集成运算放大器应用的内容,编入了一些先进的元器件和应用电路,并且把编者公开发表的数篇论文的内容写入了教材,把编者的教学经验总结写入了教材,丰富了教材内容,进一步提高了教材水平;书中写了自学的内容和打*的供选学的参考内容,可供教师根据专业特点和学时多少灵活取舍;书中有较多的例题、实例,每章后有习题,节后有思考题,例题、习题和思考题与正文内容密切配合,有利于自学,有利于组织教学;书中的图形符号和文字代号采用国家新标准。本教材适用于约 50 学时的教学之用。

全书由西安理工大学许开君(编写三、四、五、七章)和沈阳工业大学李忠波(编写二、八章)担任主编。沈阳工业大学高荣善编写第一章,西安理工大学孙强编写第六章,李炳彦编写第九章,李炳彦和王先云编写第十章,最后由许开君定稿。

本书由合肥工业大学郎璧云主审。合肥工业大学,华东工业大学,燕山大学,吉林工业大学,第二炮兵工程技术学院,西安工业学院,桂林电子工业学院等高等学校的一些老师在审稿会上也提出了许多有益的意见,编者在此一并致以衷心的感谢!

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

编 者

1994 年 2 月

目 录

前言	92
第一章 晶体管及其基本放大电路	
第一节 PN 结与晶体二极管、稳压二极管	1
第二节 晶体三极管	6
第三节 共射极基本放大电路	11
第四节 放大电路的估算方法	12
第五节 放大电路的图解分析方法	13
第六节 放大电路的微变等效电路分析法	17
第七节 稳定工作点的共射极典型放大电路	24
第八节 共集电极放大电路	28
* 第九节 共基极放大电路	31
第十节 多级放大电路	33
* 第十一节 晶体三极管混合 Π 形微变等效电路和频率特性	39
* 第十二节 基本放大电路的频率响应特性分析	42
习题	46
第二章 场效应管及其基本放大电路	
第一节 结型场效应管	53
第二节 绝缘栅场效应管	58
第三节 场效应管的主要参数	62
第四节 场效应管放大电路	63
* 第五节 功率场控器件	71
第六节 场效应管的应用举例	75
习题	77
第三章 直接耦合放大器和模拟集成电路	
第一节 直接耦合放大电路的一般问题	79
第二节 差动放大电路	83
第三节 差动放大电路的电压传输特性	
第四节 模拟集成电路	94
* 第五节 调制型直流放大器简介	99
习题	102
第四章 集成运算放大器模拟信号的运算电路	
第一节 概述	105
第二节 反相输入运算电路	106
第三节 同相输入运算电路	109
第四节 差动输入运算电路	111
第五节 交流比例运算电路	112
第六节 积分和微分运算电路	113
第七节 对数和反对数运算电路	116
* 第八节 模拟乘法器	117
* 第九节 应用实例	120
习题	124
第五章 负反馈放大电路	
第一节 概述	130
第二节 反馈的判别	132
第三节 负反馈对放大电路性能的影响	139
第四节 深度负反馈放大电路动态指标的近似计算	143
* 第五节 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法简介	147
习题	149
第六章 集成运算放大器的其它应用电路	
第一节 信号处理电路	153
第二节 信号产生电路	167
第三节 信号测量电路	170
* 第四节 有源校正电路	175
* 第五节 集成运算放大器在实际应用中的一些问题	178

第六节 应用实例	182
习题	186
第七章 正弦波振荡电路	
第一节 概述	189
第二节 RC 正弦波振荡电路	190
第三节 LC 振荡电路	196
第四节 石英晶体振荡电路	201
习题	205
第八章 功率放大电路	
第一节 概述	209
第二节 乙类互补对称功率放大电路	211
第三节 甲乙类互补对称功率放大电路	214
* 第四节 集成功率放大电路	218
第五节 晶体功率管的散热与保护	220
习题	221
第九章 直流稳压电源	
第一节 整流电路	223
第二节 滤波电路	230
第三节 硅稳压二极管稳压电路	234
第四节 串联型晶体管稳压电路	236
第五节 集成稳压电路	239
第六节 开关型稳压电路	244
习题	245

第十章 晶闸管电路	
第一节 晶闸管	249
第二节 可控整流电路	253
第三节 晶闸管的保护	263
第四节 单结晶体管触发电路	265
* 第五节 晶闸管集成触发器	272
* 第六节 晶闸管逆变电路	276
第七节 晶闸管电路应用举例	278
* 第八节 特殊晶闸管简介	284
习题	284

附录

附录 A 半导体器件型号命名方法	286
附录 B 常用半导体器件的参数	287
附录 C 集成电路型号命名	292
附录 D 国内外部分集成运算放大器同类 产品型号对照表	293
附录 E 几种国产集成运算放大器参数规 范表	294
附录 F 音频功率器件 D810 电路主要技术 指标的典型值	295
附录 G 三端式集成稳压器性能参数	295
附录 H 功率场控器件的主要参数	296
附录 I 新旧图形符号对照表	296
参考文献	297

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进措施。

第一节 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,称做“本征半导体”。在常温(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,挣脱原子的共价键束缚跳到导带,形成带负电荷的自由电子,与此同时,在价电子原来位置上留下一个空位,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。但是本征半导体中的自由电子和空穴这两种载流子总是成对出现,成对消失,数量较少,常温下本征半导体的导电性能很差。

为了控制半导体的导电性能,往往在本征半导体内掺入微量元素。当掺入少量五价元素磷或锑时,形成共价键后,提供多余的价电子,几乎都形成自由电子。于是自由电子是多数载流子,而空穴是少数载流子,这叫N型半导体。若掺入少量三价元素硼或铟时,形成共价键后,晶体中产生多余的空穴,因此空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子,这叫P型半导体。

上述的N型(电子型)和P型(空穴型)半导体,宏观上看,正、负电荷总是相等的,保持电中性。

1. PN 结的形成

本征半导体通过掺杂过程,使得晶体内部形成P型和N型半导体。在交界面的两侧,P区的空穴、N区的自由电子都是多数载流子,因浓度的差异,要分别向对侧扩散,扩散的结果破坏了P区和N区的原来电中性,由N区扩散到P区的自由电子,与空穴复合,使得自由电子和空穴同时消失,留下不能移动的带负电的离子;而从P区扩散到N区的空穴与自由电子复合,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,叫内建电场。随着扩散运动的进

行,内建电场增加,它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,开始扩散大于漂移,随着空间电荷区的逐渐加厚,内建电场增强,又迫使扩散减弱,漂移增强,最后扩散和漂移运动相等时,处于动态平衡,空间电荷区形成稳定状态,叫做PN结。厚度一般为十几微米。PN结又称阻挡层。

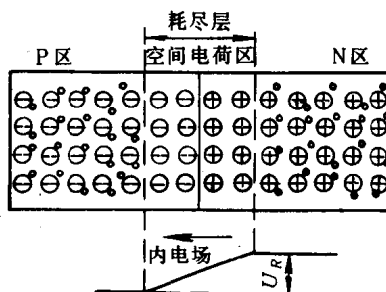


图 1-1 动态平衡状态下的 PN 结

因为多数载流子的扩散电流与少数载流子漂移电流在动态平衡时,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,即电源的正极接 N 区,负极接 P 区,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,驱使空间电荷区增加,PN 结加厚,多数载流子的扩散运动被显著阻碍,扩散电流明显减弱;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,温度又不变时,少数载流子的浓度基本不变。此时通过 PN 结的电流主要是漂移电流,其大小与反向电压基本无关,方向由 N 区流入 P 区,常称反向饱和电流,其值较小。PN 结在反向偏置时,电阻率极大,不导通,相当于截止,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。此时,PN 结电阻率很小,称做 PN 结导通。

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。规定二极管文字符号为 V,图形符号用箭头和一短线表示,箭头方向表示正向电流方向,箭头一侧为阳极,短线一侧为阴极。

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,可用实验方法测得,或用图示仪 JT-1 测之。在直角坐标系中横坐标轴表示二极管管压降 $U(V)$,纵坐标轴表示其电流 $I(mA)$,如图 1-2 a、b 所示。图 a 为硅二极管 2CP10 的伏安特性,图 b 为锗二极管 2AP15 的伏安特性。

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 0 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_m 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 0.5V，锗二极管为 0.1V。

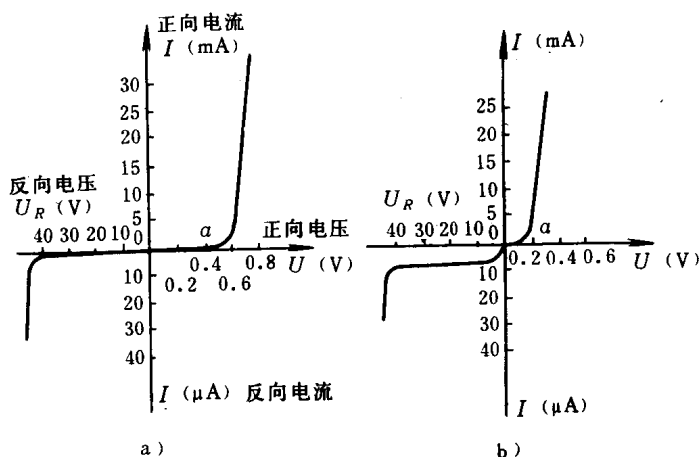


图 1-2 二极管伏安特性

正向电压超过门坎电压 U_m 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。通常硅管压降变化为 0.6~0.8V；锗管为 0.2~0.3V。当环境温度变化时，在室温附近，温度每升高 1℃，二极管的正向降压减小 2~2.5mV。

(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，故漂移运动起主要作用，反向电流几乎不变，叫反向饱和电流。其值对于硅管小于 0.1μA，锗管在十几微安，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_R 。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。

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，其伏安方程有：

$$I = I_{SR}[\exp(U/U_T) - 1] \quad (1-1)$$

式中， U_T 为温度电压当量，在常温 (300K) 情况下， $U_T = 26\text{mV}$ ； I_{SR} 为反向饱和电流； I 为二极管的电流； U 为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 $|U| \gg 26\text{mV}$ 时，有 $\exp(U/U_T) \approx 0$ ，

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

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的电流为反向。典型值硅管约为纳安 (nA 即 10^{-9}A) 量级；锗管为微安 (μA 即 10^{-6}A) 量级。

若二极管承受正向偏压时，通常 $U \gg 26\text{mV}$ ，有 $\exp(U/U_T) \gg 1$ ，则

$$I = I_{SR}\exp(U/U_T) \quad (1-3)$$

这就是二极管电流随正向偏压按指数上升的规律。当 U 在 0 到门坎电压之间时，PN 结厚度受影响很小，因参加运动的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，也不过太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,经验值是,温度每升高 10°C ,反向电流约增大一倍。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} 的一半。

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欧至几千欧;反向电阻大于几十千欧至几百千欧。

(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,用微变电阻 R_d 描述。它是在二极管伏安特性曲线上的工作点,为切线斜率的倒数。

从特性方程可求出:

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

则

$$R_d = \frac{U_T}{I_Q} = \frac{26\text{mV}}{I_Q} \quad (1-4)$$

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

可见微变电阻 R_d 与工作点有关。

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 结空间电荷改变,存在一个结势垒电容,它与 PN 结面积成正比,与空间电荷区厚度成反比,其值为 $0.5 \sim 100\text{pF}$ 。反向偏置时,因为二极管反向电阻较大,那么结势垒电容作用显得突出。

二极管正向偏置时,由于多数载流子扩散到对侧形成电荷堆积而构成扩散电容,其值在 0.1pF 至几十皮法。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

从特性曲线上看到,二极管正向偏压导通时存在管压降,硅管平均为 0.7V ;锗管平均为 0.3V 。反向偏压相当于截止。所以有二极管折线电路模型:

正偏压时, $I > 0, U \approx U_{on}$;理想情况相当于短路;反偏压时, $I \approx 0$,相当开路。

5. 二极管应用举例

二极管的单向导电特性,可用来进行整流、检波、限幅和钳位等。

例 1-1 在图 1-3 a 电路中,已知 $R = 2\text{k}\Omega, u_i = 10\sin\omega t(\text{V})$,二极管 V_1, V_2 的正向导通压

降为 0.6V, 忽略反向电流, 试画出 u_o 波形。

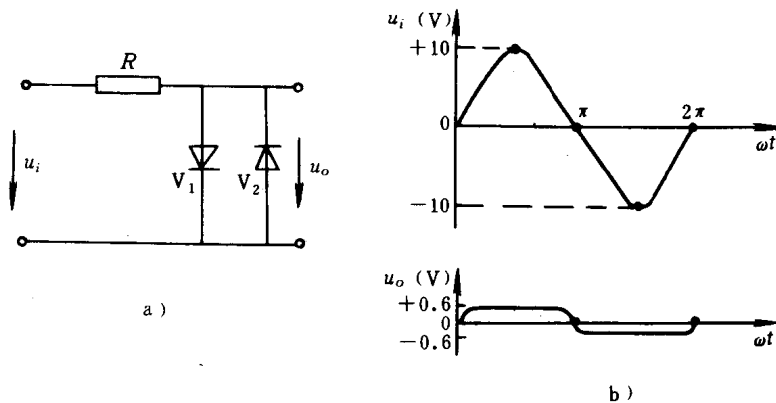


图 1-3 例 1-1 图

解 正半波, 当 $u_i < U_{on}$, 两个二极管 V_1 、 V_2 均截止, 电流为零, 电阻 R 上没有压降, 则 $u_o = u_i$; 当 $u_i > U_{on}$, V_1 导通, 多余电压降在 R 上, $u_o = +U_{on}$; 负半波同此推理。则 $u_o = \pm U_{on}$, 波形如图 1-3b 所示。这是双向限幅电路。

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, 它与电阻配合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 1-4 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 ($I_{zmin} \sim I_{zmax}$) 内增长时, 管两端电压只有少许增加, 变化很小, 具有稳压性能。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。

稳压管的符号见图 1-4。

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 3~25V, 高的可达 200V。

(2) 稳定电流 I_z 稳压管正常工作时的参考电流。开始稳压时对应的电流叫最小稳压电流 I_{zmin} ; 对应额定功耗时的稳压电流叫最大稳压电流 I_{zmax} 。正常工作电流 I_z 取其 $I_{zmin} \sim I_{zmax}$ 间某个值。

(3) 动态电阻 R_z 稳压管端电压的变化量 ΔU_z 与对应电流变化量 ΔI_z 之比, 叫稳压管的动态电阻 R_z 。

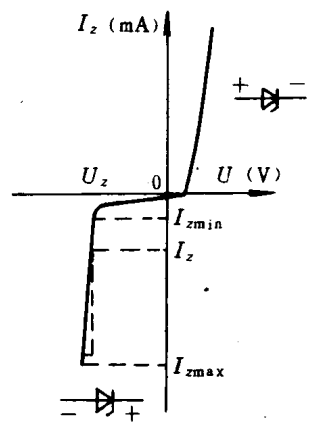


图 1-4 稳压二极管伏安特性

即

$$R_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (1-5)$$

其值在几欧至十几欧。

(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 $9 \times 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$, 并且有个规律: 稳压值低于 4V 的稳压管, 电压温度系数为负(表现齐纳击穿); 高于 7V 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。

$$P_{zM} = U_z I_{z\max} \quad (1-6)$$

3. 稳压二极管的应用

稳压二极管主要用来构成稳压电路, 如图 1-5 所示。

U_i 是不稳定的可变直流电压, 需要得到稳定的电压 U_o , 在二者之间加稳压电路。它由限流电阻 R 和稳压管 V_z 构成, R_L 是负载电阻。

例 1-2 在图 1-6 中, 已知稳压二极管的 $U_z = 6.3\text{V}$, 当 $U_i = \pm 20\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$, 求 U_o ? 已知稳压二极管的正向压降 $U_D = 0.7\text{V}$ 。

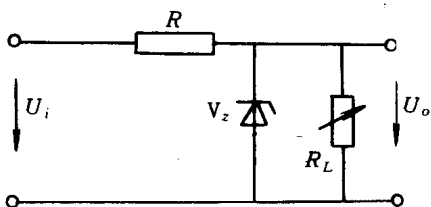


图 1-5 稳压管稳压电路

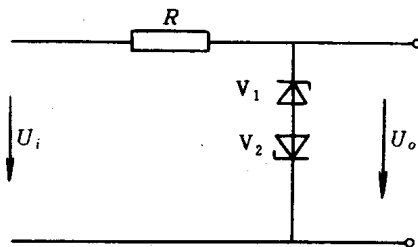


图 1-6 例 1-2 图

解 当 $U_i = +20\text{V}$, V_1 反向击穿稳压 $U_{z1} = 6.3\text{V}$, V_2 正向导通, $U_{D2} = 0.7\text{V}$, 则 $U_o = +7\text{V}$; 同理 $U_i = -20\text{V}$, $U_o = -7\text{V}$ 。

思考题

1-1-1 怎样用万用表电阻档 $\times 1\text{k}$ 判断二极管的阳极、阴极和好坏?

1-1-2 有一个二极管, 在温度 15°C 时, 正向导通管压降为 0.65V , 反向饱和电流 I_{SR} 为 $0.1\mu\text{A}$, 问温度 45°C 时, 管压降和反向饱和电流各是多少?

1-1-3 试说明图 1-5 稳压过程?

第二节 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, 简称晶体管。

1. 晶体三极管的构造

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,晶体三极管的结构示意图和符号如图1-7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,约几微米到十几微米。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晶体三极管分为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、超高频晶体三极管;按额定功率不同分为小功率、中功率、大功率晶体三极管等。

晶体三极管的电路符号见图1-7b。其中带箭头的电极是发射极,箭头方向指示晶体三极管工作时实际的电流方向。

2. 晶体三极管的工作原理

晶体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1-8电路是以NPN型硅三极管接成共射形式的示意图。

现在外电路提供给晶体三极管的条件是:电压源 V_{BB} 通过电阻 R_B 提供给发射结正向偏置;而电压源 V_{CC} 通过电阻 R_C 加到集电极,使集电结处于反向偏置。在这种外部条件下,晶体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 。

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。由于基区做的很薄,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

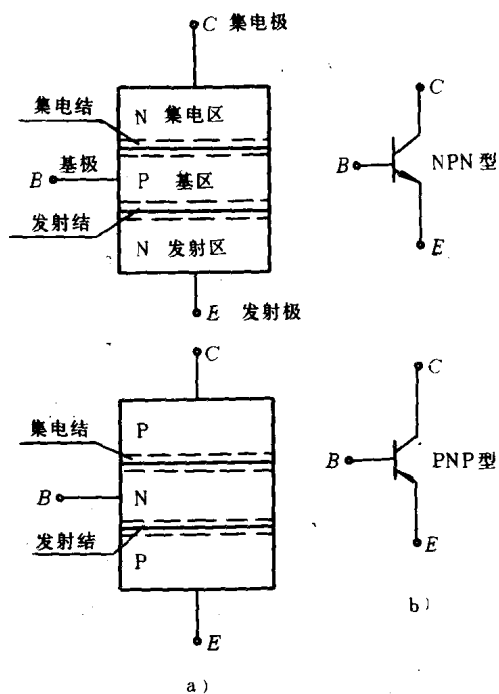


图1-7 晶体三极管的结构示意图和符号
a)结构 b)符号

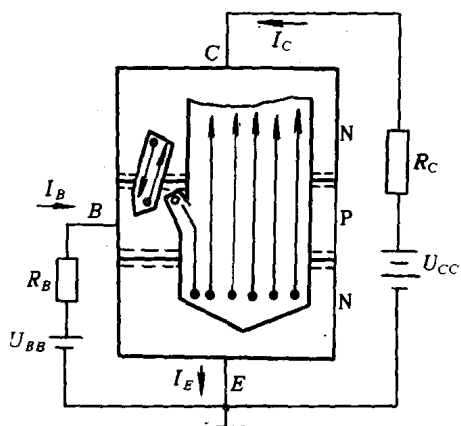


图1-8 NPN型三极管共射电路示意图

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形成集电极电流 I_C 的主要部分。

显然, 基极电流 I_B 远小于集电极电流 I_C , 并且发射极电流 I_E 一定等于 I_B 与 I_C 之和, 即

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-7)$$

当考虑集电结反向饱和电流 I_{CBO} , 则有

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (1-8)$$

$$I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO} \quad (1-9)$$

由式(1-9)和式(1-8)可得

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} \quad (1-10)$$

其中 $\alpha = I_C / I_E$; $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$; $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。

上述可知, 晶体三极管的发射结正偏压, 集电结反偏压, 晶体三极管有电流放大作用, 电流放大系数

$$\beta = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad (1-11)$$

因此晶体三极管为电流控制器件。因为参加导电的有多数载流子和少数载流子, 故又叫双极型晶体三极管。

至于 PNP 型三极管, 外部电压源极性相反, 注入载流子为空穴, 实际电流方向相反, 分析方法相似。

二、晶体三极管的伏安特性曲线

晶体三极管有三个电极, 以哪一个电极为其公共端, 就会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, 即共射组态的伏安特性曲线。晶体三极管是两端口的非线性器件, 如图 1-9 所示。其中图 a 为 NPN 型, 图 b 为 PNP 型。

晶体三极管的特性曲线可通过晶体管图示仪测得。

1. 输入伏安特性曲线

当集电极与发射极间的电压 u_{CE} 为某一常数时, 晶体三极管的基极与发射极间电压 u_{BE} 改变对基极电流 i_B 的影响关系曲线, 叫输入特性曲线。

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

具体的输入特性曲线如图 1-10 所示。

从输入特性曲线上看到:

① 晶体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电压 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 $u_{CE} = 0V$; 另一条对应 $u_{CE} > 1V$ 。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 $1V$ 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。

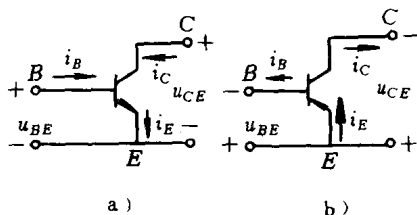


图 1-9 NPN 和 PNP 三极管两端口电路
a) NPN 型 b) PNP 型

②同样存在一个“死区电压”，硅管 $u_{BE} < 0.5\text{V}$ 、锗管 $u_{BE} < 0.1\text{V}$, $i_B = 0$; 并且 $i_B > 0$ 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

输出特性曲线用函数关系表示:

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B = \text{常数}} \quad (1-13)$$

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 3DG6 输出特性如图 1-11 所示。

从输出特性曲线上看到, 它大致分三个区域。

(1)截止区 它对应 $i_B = 0$ 以下的区域。对于硅三极管 $u_{BE} < 0.5\text{V}$, 锗管 $u_{BE} < 0.1\text{V}$, 可认为 $i_B = 0$, 但为了可靠截止, 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 $i_B = 0$, $i_C = I_{CEO}$, $u_{CE} \approx V_{CC}$ 。

(2)饱和区 当 u_{CE} 很小时, i_C 随 u_{CE} 增加直线上升变化。在该区域内, $u_{BE} > u_{CE}$, 即是硅管 $u_{CE} \leq 0.7\text{V}$, 锗管 $u_{CE} \leq 0.3\text{V}$ 的区域。饱和区的外部条件是发射结正向偏压, 集电结也正向偏压。特点是 $i_C \neq \beta i_B$, 在深度饱和时小功率硅管的饱和压降 $u_{CES} \approx 0.3\text{V}$, 锗管 $u_{CES} \approx 0.1\text{V}$ 。

(3)放大区 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。放大区的外部条件是发射结正向偏压, 集电结反向偏压。通常硅管 $0.7\text{V} < u_{CE} < V_{CC}$, 锗管 $0.3\text{V} < u_{CE} < V_{CC}$ 。

三、晶体三极管的主要参数

1. 电流放大系数

共射电流放大系数:

(1) 直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad (1-14)$$

(2) 交流电流放大系数

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C_2} - I_{C_1}}{I_{B_2} - I_{B_1}} \\ &= \frac{(\beta I_{B_2} + I_{CEO}) - (\beta I_{B_1} + I_{CEO})}{I_{B_2} - I_{B_1}} \end{aligned}$$

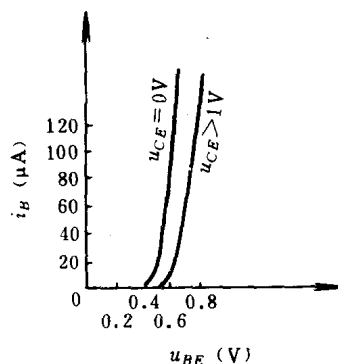


图 1-10 NPN 三极管 3DG6 的输入特性曲线

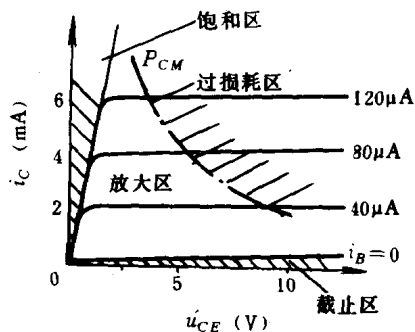


图 1-11 NPN 三极管 3DG6 输出特性曲线

$$\approx \frac{\beta(I_{B_2} - I_{B_1})}{I_{B_2} - I_{B_1}} = \beta \quad (1-15)$$

因此,当 β, I_{CEO} 保持不变时, $\beta = \bar{\beta}$ 。以后采用 β 与 $\bar{\beta}$ 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 值为 0.95~0.995。并有

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

或

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (1-17)$$

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 $0.1\mu\text{A}$ 以下;锗管 I_{CBO} 在几微安至十几微安。

(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:

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} \quad (1-18)$$

它是衡量晶体三极管质量好坏的重要参数之一,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 5V 左右。

当发射极开路时,集电极—基极间的反向击穿电压 BU_{CBO} ,一般在几十伏以上。

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}

$$P_{CM} = i_C u_{CE} \quad (1-19)$$

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(1-19)在图 1-11 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 $i_C u_{CE} > P_{CM}$,在 P_{CM} 曲线的右上方,称做功率过损耗区;当 $i_C u_{CE} < P_{CM}$,在 P_{CM} 曲线的左下方是晶体三极管功率损耗安全工作区(大功率管要加散热片)。

四、晶体三极管参数与温度的关系

环境温度变化时,对晶体三极管的参数 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。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} 受温度影响更加敏感。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 $-(2 \sim 2.5)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, 即温度每升高 1°C , U_{BE} 将减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$, 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 随温度升高而增大。温度每升高 1°C , β 增加 $0.5\%\sim 1.0\%$ 。

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。

思考题

1-2-1 怎样用万用电阻 $\times 1\text{k}$ 档判断晶体三极管是 NPN 型还是 PNP 型? 同时确定 E 、 B 、 C 三个电极。

1-2-2 有两个晶体三极管,一个管的 $\beta=150$, $I_{CEO}=200\mu\text{A}$,另一管的 $\beta=50$, $I_{CEO}=10\mu\text{A}$,其它参数一样,你选取哪个管? 为什么?

1-2-3 某一低频小功率管 10°C 时测得 $\beta=50$, $I_{CBO}=1\mu\text{A}$,则 $I_{CEO}=?$ 如温度升至 40°C ,则 I_{CEO} 又将是多少?

第三节 共射极基本放大电路

放大电路主要是利用晶体三极管的电流控制作用把微弱的电信号放大到所要求的数值。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能量,推动扬声器还原成较大的声音。

一、共射基本放大电路的组成及各元件功能

共射基本放大电路如图 1-12 所示。它由 NPN 型三极管和直流电源 V_{CC} , 电阻 R_B 、 R_C 及电容 C_1 、 C_2 组成共射放大电路。输入电压信号 u_i 加到输入端 1-1', 被放大的电压信号 u_o 从输出端 2-2' 取出。

其中直流电源 V_{CC} 提供能量的来源,与电阻 R_B 、 R_C 确定晶体三极管合适的静态工作点,保证晶体三极管的发射结正向偏压,集电结反向偏压,在放大区工作三极管起电流放大和控制作用。电阻 R_C 将晶体三极管集电极电流 i_C 的变化转换为集电极电压 u_{CE} 的变化。电容 C_1 、 C_2 能隔住直流量,称

“隔直电容”,又能顺利地让变化的交流量通过,又叫“耦合电容”。

二、共射基本放大电路的静态与动态分析

当放大电路没有输入电压信号时,即 $u_i=0$, 电路中的电压、电流都是不变的直流量,称电路静止状态,简称“静态”。用晶体三极管的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 表征,叫“静态工作点”值。

放大电路输入端 1-1' 加输入电压信号 u_i [$u_i=U_{im}\sin(2\pi ft)$], 电路中的电压、电流随之变动的状态,简称“动态”。由于耦合电容 C_1 、 C_2 取值较大,其容抗很小,视为短路。输入信号 u_i 没

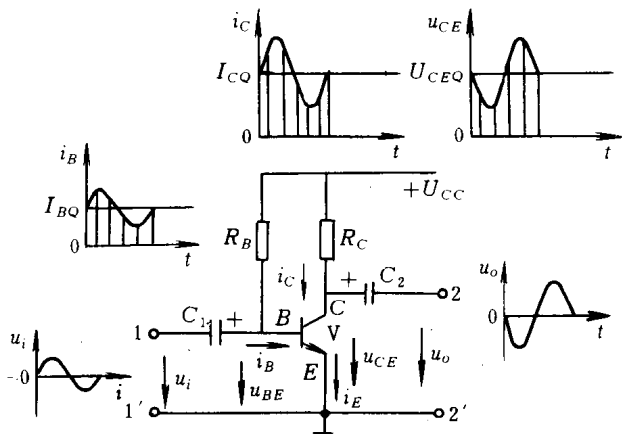


图 1-12 共射基本放大电路