

GH

高 等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

谢沅清 严国萍

模拟电子线路解题指南

MONI
DIANZIXIANLU
JIETIZHINAN

7710-44

331

电子科技大学出版社

模拟电子线路解题指南

谢沅清 严国萍

电子科技大学出版社

77 701 101

[川]新登字 016 号

模拟电子线路解题指南

谢沅清 严国萍

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

成都农垦总公司印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 311 千字

版次 1995 年 5 月第一版 印次 1995 年 5 月第一次印刷

印数 1—10000 册

ISBN 7-81043-107-2/TN·11

定价: 8.60 元

内 容 提 要

本书是《模拟电子线路〈I〉〈II〉》(谢沅清编)的配套教材。内容章次按该书安排。包括半导体器件、放大、反馈、振荡、调制解调、倍频、变频、反馈控制电路、噪声等。各章内容分为两部分:第一部分讲述解题基本知识、思路和方法。第二部分是解题举例。例题除取自《模拟电子线路〈I〉〈II〉》中的一些较难的习题外,还选有本科生该课程的考题和硕士研究生入学试题。本书可供高等学校电子工程、通信、无线电技术和自动化专业的学生和教师参考,对报考硕士学位的学生,可作为应考电子电路的辅助读物。

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业 1991~1995 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会电路与系统编审小组征稿并推荐出版,责任编委为张肃文。

本教材由北京邮电大学谢沅清担任主编,北京理工大学罗伟雄担任主审。

本教材是模拟电子线路(I)(II)的配套教材。内容的章次按模拟电子线路(I)(II)安排。各章内容均分为两部分,第一部分是解题必备的基本知识,概要地讲述模拟电子线路(I)(II)主教材有关章节的基本概念、解题的思路和方法。第二部分是解题举例。例题除取自模拟电子线路(I)(II)主教材外,还补充了若干题目,其中相当一部分取自模拟电子线路本科生课程的期中和期末考题及硕士研究生入学试题。

各章解题必备基本知识,对使用模拟电子线路(I)(II)作为教材的读者,可以起到复习和巩固基本内容的作用。对没有阅读过模拟电子线路(I)(II)的读者,有助于理解第二部分解题举例。

第二部分的取材和编写,力求做到:

1. 易于从主教材获取答案的题目不予列选。
2. 每个题目都有一定的代表性,避免雷同或相似。
3. 题解不仅仅是一个简单的答题叙述,还兼述解题思路。有些情况还对所得结果加以讨论,深入理解结论的意义,引导读者扩大知识面。
4. 题型力求多样化,有概念题、工程计算(估算)或设计题,也有故障分析的思考题,还有少量读图识图题。

使用本教材的读者请注意,对采用模拟电子线路(I)(II)作为教材的读者,建议在独立思考的基础上做了主教材章末所附习题以后,再参看本教材的解题举例。但在做习题期间,可以阅读本书各章第一部分解题必备基本知识,会有助于解题。另外,对那些工程设计题,本书给出的解答只是一种可能的解,而不是唯一的解,请读者不要拘泥于本书给出的解答。

本教材主要由谢沅清编写,严国萍提供了部分解题举例的素材。审稿人罗伟雄教授为本书提出了许多宝贵意见,对提高本书质量有很大帮助,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平及时间所限,本书的取材还不够广泛,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

常用符号表

一、基本符号

I, i	电流	C	电容
U, u	电压	M	互感
P, p	功率	A	放大倍数
R, r	电阻	t	时间、摄氏温度
G, g	电导	T	绝对温度、热力学温度
X, x	电抗	f, F	频率
B, b	电纳	ω, Ω	角频率
Z, z	阻抗	BW	带宽
L	电感		

二、不同书写体电压、电流

小写 $u(i)$ 小写下标表示交流电压(电流)瞬时值(例如, u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压瞬时值)

大写 $U(I)$ 大写下标表示直流电压(电流)值(例如, U_{BE} 表示基极与发射极之间直流电压值)

小写 $u(i)$ 大写下标表示含有直流电压(电流)的瞬时值(例如, u_{BE} 表示基极与发射极之间含有直流电压的瞬时值)

大写 U 大写双字重复下标表示直流供电电压(例 U_{CC} 表示集电极直流供电电压)

三、正弦信号作用下,复数、模、相角的符号

$U(j\omega) = U(\omega)e^{j\phi(\omega)}$ 正弦电压复数值

$U(\omega), \phi(\omega)$ 电压的模和相角

$U(S)$ 电压的拉氏变换

阻抗、导纳、放大倍数同上。

四、角标含义

i 输入量(例如, u_i 为输入电压)

电流量(例如, A_i 的电流放大倍数)

o 输出量(例如, u_o 为输出电压)

L 负载上量(例如, u_L 为负载上电压)

f 反馈量(例如, u_f 为反馈电压, A_f 为加有反馈时的放大倍数)

s 信号源量例如, u_s 为信号源电压, A_s 为从信号源计算的放大倍数)

d 直流分量(例如, U_d 为电压直流分量)

R 基准量例如, U_R 为基准电压)

五、功率

P_o 集电极损耗功率

六、频率

- f_l 3dB 下限(截止)频率
 f_h 3dB 上限(截止)频率
 $BW_{0.7}$ 3dB 带宽
 $BW_{0.1}$ 传输系数下降 20dB 带宽
 f_0 回路固有谐振频率

七、器件符号及参数

二极管代号

- VD 普通二极管
 VDW 稳压二极管

二极管参数

- U_D 导通电压
 I_S 反向饱和电流
 U_Z 稳压管的击穿电压
 $U_T \left(= \frac{kT}{q} \right)$ 热电压

三极管代号 VT

三极管参数

- I_{CBO} 发射极开路时的集电结反向饱和电流
 I_{CEO} 基极开路时的集电极发射极间电流(穿透电流)
 I_{CM} 集电极最大容许电流
 U_{CES} 集电极发射极间的饱和压降
 BU_{CBO} 发射极开路时的集电结击穿电压
 BU_{CEO} 基极开路时的 CE 间击穿电压
 U_A 欧拉电压
 p_{CM} 集电极最大容许功耗
 g_m 跨导
 α 共基极短路电流放大系数
 f_a 共基极短路电路放大系数的截止频率
 f_β 共发射极短路电路放大系数的截止频率
 f_T 特征频率(β 降至等于 1 的频率)

八、其它符号

- | | | | |
|----------|---------|-------|--------------|
| Q | 品质因素 | K_M | 相乘器的相乘增益 |
| D | 矩形系数 | m_a | 调幅系数 |
| η | 耦合因素或效率 | m_f | 调频系数 |
| p | 接入系数 | m_p | 调相系数 |
| θ | 电流通角 | S_f | 调频灵敏度(压控灵敏度) |
| α | 电流分解系数 | F | 噪声系数 |

目 录

第一部分 模拟电子线路〈I〉

第一章 半导体元器件	(1)
一、解题必备基本知识	(1)
二、解题举例	(3)
第二章 放大器基础	(10)
一、解题必备基本知识	(10)
二、解题举例	(13)
第三章 放大器中的反馈	(23)
一、解题必备基本知识	(23)
二、解题举例	(24)
第四章 放大器的频率特性	(36)
一、解题必备基本知识	(36)
二、解题举例	(38)
第五章 场效应管及其放大电路	(48)
一、解题必备基本知识	(48)
二、解题举例	(48)
第六章 功率输出级	(52)
一、解题必备基本知识	(52)
二、解题举例	(54)
第七章 模拟集成电路基础	(57)
一、解题必备基本知识	(57)
二、解题举例	(58)
第八章 集成放大器	(66)
一、解题必备基本知识	(66)
二、解题举例	(67)
第九章 运算放大器应用	(72)
一、解题必备基本知识	(72)
二、解题举例	(73)
第十章 电压比较器和模拟相乘器	(95)
一、解题必备基本知识	(95)
二、解题举例	(96)
第十一章 直流电源	(105)
一、解题必备基本知识	(105)

二、解题举例	(106)
--------------	-------

第二部分 模拟电子线路〈Ⅱ〉

第一章 小信号选频放大	(110)
一、解题必备基本知识	(110)
二、解题举例	(112)
第二章 高频功率放大	(117)
一、解题必备基本知识	(117)
二、解题举例	(119)
第三章 信号产生电路	(129)
一、解题必备基本知识	(129)
二、解题举例	(131)
第四章 非线性波形变换	(146)
一、解题必备基本知识	(146)
二、解题举例	(147)
第五章 线性频率变换	(165)
一、解题必备基本知识	(165)
二、解题举例	(167)
第六章 非线性频率变换	(178)
一、解题必备基本知识	(178)
二、解题举例	(179)
第七章 反馈控制电路	(188)
一、解题必备基本知识	(188)
二、解题举例	(191)
第八章 电子电路中的噪声	(201)
一、解题必备基本知识	(201)
二、解题举例	(202)

第一部分 模拟电子线路〈 I 〉

第一章 半导体元器件

一、解题必备基本知识

(一)PN 结与二极管

1. PN 结的主要特性

定性地说,PN 结具有单向导电特性。当外加电压的正端施加于 P 型半导体一方,负端施加于 N 型半导体一方,电流大,称为导通;反过来,电流甚小,称为截止。

PN 结(二极管)伏安特性的数学表示式为

$$i = I_s \left[\exp\left(\frac{u}{U_T}\right) - 1 \right]$$

式中

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

严格说来,式中的电压 U 不是外加电压,而应是降落于 PN 结上的净电压,它等于外加电压减去半导体体积电阻上的电压。

上述 PN 结(二极管)伏安特性的数学表示式中值得注意的是 I_s 和 U_T 随温度而变,在室温附近,温度每升高 8°C , I_s 增加约一倍。因为 I_s 和 U_T 随温度的升高而增大,故在电流 i 固定的情况下,所需的外加正向电压减小。在室温附近,温度每升高 1°C ,正向压降减小约 2mV 。

实际的 PN 结(二极管)伏安特性,和上述数学式所示理想特性有两点主要区别,其一是正向电压作用下,当电流较大时,由于体电阻的影响,电流随电压的增长速度比指数律要慢,电流越大这一现象越显著。其二是在反向电压作用下,当反向电压大到某一值时,发生击穿现象,即电流迅速增大,而电压增长甚微。

2. PN 结(二极管)的主要参数及等效电路

PN 结(二极管)用电阻来等效,随外加电压不同而有所不同。

正向电压作用下的等效电阻称正向电阻,反向电压作用下的等效电阻称反向电阻。正向电阻的值很小。反向电阻的值很大。等效电阻又有直流电阻和交流电阻之分。正向电阻随电流的增大而减小,交流电阻比直流电阻小。不计体电阻时,在室温附近正向电阻的表示式为

$$r = \frac{26}{I_s}$$

式中 I_s 是通过结的直流。

由于电流随电压按指数律增长,在正向电压较小的区间,电流远小于正常运用值(例如1mA),在工程上为了简化计算,定义一个导通电压 U_D ,近似认为小于该电压下的电流值,可忽略不计。对锗材料的PN结,取 $U_D=0.2V$,对硅材料的PN结,取 $U_D=0.6V$ 。

(二)三极管

三极管由两个背靠背的PN结构成,但是不能由两个分离的PN结连接成三极管。因为组成三极管的两个PN结在其连接处保持晶体结构的连续性,而且这个区域很薄,以保证少数载流子的复合百分数很小。

1. 三极管的电流电压特性

分析三极管的电流电压特性,依据基区少数载流子密度分布曲线的形状来确定各电流的大小是最基本的方法。首先由两个结电压决定基区靠近发射区和集电区两界面的少数载流子密度。由该两个密度确定基区少数载流子分布曲线的形状。靠近发射区曲线的斜率决定发射极(扩散)电流的大小,靠近集电区曲线的斜率决定集电极(扩散)电流的大小。曲线覆盖的面积决定基极(复合)电流的大小。这一方法,无论是作定量分析或定性分析,都是有效的,可以避免误将施加于导体两端的电压对电流的影响的概念来分析三极管各极电压对电流的作用。

对三极管来说,发射结电压与电流的关系和PN结电压与电流的关系相同。集电结电压 U_{CB} 对电流的控制作用甚小,集射极间电压 U_{CE} 对电流的控制作用较大,其近似关系式可表示为

$$\frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{U_A + U_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

式中 U_A 称作欧拉电压,对多数小功率管,其值一般为50V左右。

2. 三极管的放大作用

三极管的放大作用是利用了下述电压、电流关系。

(1)正向结电压对电流的控制作用大,反向结电压对电流的控制作用小。

(2)在放大区,基极电流比发射极电流和集电极电流的任何一个都要小得多。

因此,要使晶体管有放大作用,必须给发射结加正向电压,给集电结加反向电压,以使得两个结对电流的控制作用不同,输入电压施加于发射结,输出电压取自集电结(或集电极与发射极之间),并且负载电阻足够大,方可获得电压放大。要得到电流放大,输入电流必须是基极电流。

3. 三极管的基本参数

(1)电流放大系数

以基极作为输入、输出公共端的共基极电流放大系数 α 和以发射极作为输入、输出公共端的电流放大系数 β ,这两个电流放大系数都是以输出端电压不变——相当于交流短路情况下定义的,故又称短路电流放大系数。

导出关系式 $\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$ 和 $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ 时,近似认为CB短路和CE短路效果相同。实际上,CE短路改变BE间电压时,CB间的电压变化和BE间的电压变化量相同,在放大区,CB间电压的变化对电流的影响远比BE间电压变化对电流的影响小。这样近似处理导致的误差是十分小的。

(2) 输入电阻

共发射极情况下的输入电阻

$$r_{ie} = r_b + \frac{26\beta}{I_{CQ}}$$

共基极情况下的输入电阻

$$r_{ib} = \frac{r_{ie}}{1 + \beta} = \frac{r_b}{1 + \beta} + \frac{26}{I_{CQ}}$$

导出这两个电阻的表示式时,均未计入输出端电压对电流的影响,在工程计算中,由此而引起的误差是不大的。

(3) 击穿电压

分析击穿电压时,应注意两个PN结承受电压在管内产生的电流。外加电压施加于CB间,E开路,发射结承受的电压为零,管内电流最小,击穿电压最大,用 BU_{CBO} 表示。外加电压施于CE间,B开路,BE间承受电压(相对于E开路或BE间接电阻R)最大,击穿电压最小,用 BU_{CES} 表示。BE间所接电阻R值不同,影响BE间承受电压,改变管内电流值,从而改变击穿电压值,电阻 $R=0$ 时击穿电压表示为 $B U_{CES}$ 。

二、解 题 举 例

I-1-1 将一个二极管看作一个电阻,它和一般由导体构成的电阻有何区别?

答:将二极管看作一个电阻,其明显的特点是非线性特性。而一般由导体构成的电阻,在有限的电压、电流范围内,基本上是线性的,具体表现在:

1. 二极管的正反向电阻,其数值相差悬殊。正向电阻很小,而反向电阻很大。
2. 在正向电压下,二极管的等效电阻随工作点电流大小变化。工作点电流小时等效电阻大,而工作点电流大时等效电阻小。

I-1-2 一个二极管的伏安特性用 $I = 20 \times 10^{-12} (\exp(\frac{U}{U_T}) - 1)$ (A) 来表示,设 $U_T = 26\text{mV}$ 。当用一个1.5V的干电池接在上述二极管的两端,将有多大电流通过? 是否与实际情况相符?

解:将 $U=1.5\text{V}$ 代入题中的伏安特性方程可得

$$I = 20 \times 10^{-12} (\exp(\frac{1500}{26}) - 1) \approx 20 \times 10^{-12} \times \exp(\frac{1500}{26})$$

$$\lg I = \lg 20 - 12 + \frac{1500}{26} \lg e = 14.3395$$

故

$$I = 2.185 \times 10^{14} (\text{A})$$

实际上二极管内部的体电阻,引线电阻以及电池的内阻都能起限流作用,所以通过二极管的电流要比上述计算值小得多。然而,这种情况将造成二极管烧毁或者电池由于电流过大而发热失效。因此在工作时不可把电源直接接到二极管的两端。

I-1-3 在用万用表的电阻档测二极管的正向电阻时,发现用 $R \times 10$ 档测出的阻值小,而用 $R \times 100$ 档测出的阻值大,为什么?

答:因为二极管的伏安特性为 $I = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$ 即电压和电流不是正比关系,所以当不同的

电流通过管子时,管子两端的电压和电流的比值(就是测出的电阻值)也不同。

通常万用表欧姆档的电池电压为 1.5V, $R \times 10$ 档时,万用表的内阻为 $R_i = 150\Omega$, $R \times 100$ 档时万用表的内阻为 $R_i = 10R_i = 1500\Omega$ 。用万用表测二极管所构成的电路如图 I-1-1(a) 所示。图中虚线方框内所示电路为万用表的等效电路。

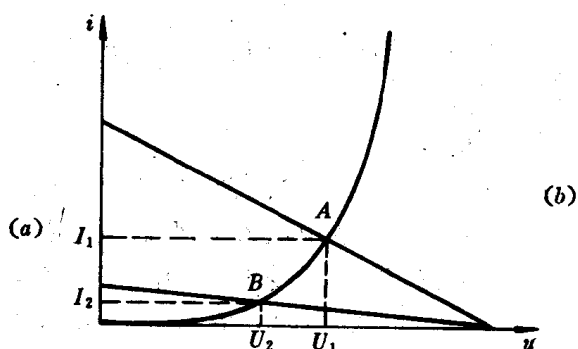
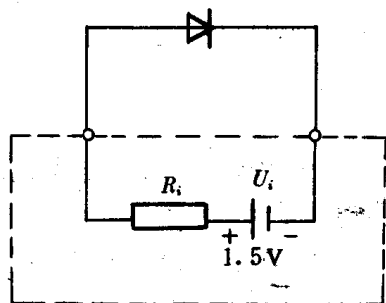


图 I-1-1

由图可得管子两端的电压 U 和电流 I 之间有下列关系:

$$R \times 10 \text{ 档: } U = 1.5 - IR_i$$

$$R \times 100 \text{ 档: } U = 1.5 - IR_i = 1.5 - 10IR_i$$

这两个方程式在 $U-I$ 坐标系中均为直线,如图 I-1-1(b)所示,从二极管本身的特性看,管子的电压和电流又应满足特性曲线所表示的规律。因此,同时受这两种关系约束的电压电流必定在特性曲线与直线的交点上。用 $R \times 10$ 档测量时,交于图中 A 点,万用表读数为 U_1/I_1 。用 $R \times 100$ 档测时,交于图中 B 点,万用表读数为 U_2/I_2 。显然前者的阻值较小而后者的阻值大。这里所测的电阻是直流电阻。

I-1-4 有一只二极管,在室温 27°C 时,反向饱和电流 I_s 为 $0.01\mu\text{A}$ 。设在室温附近温度每升高 1°C ,势垒下降 2mV ,问该管在 77°C 和 127°C 时,反向饱和电流值各为多少?

解:根据 $i = I_s(e^{\frac{qU}{kT}} - 1)$

正向电压足够大时,就有

$$e^{\frac{qU}{kT}} \gg 1$$

故有

$$i = I_s e^{\frac{qU}{kT}}$$

根据在室温附近温度每升高 1°C ,势垒电压降低 2mV 。则当温度由 27°C 上升至 28°C 时, T 由 $273+27=300(\text{K})$ 变至 $273+28=301(\text{K})$,或将外加电压由 u 变至 $u-2$,但人为地将通过二极管电流保持不变,于是有

$$I_s e^{\frac{qU}{kT}} = I'_s e^{\frac{q(u-2)}{kT}}$$

式中 I_s 为 $T=300(\text{K})$ 时的反向饱和电流, I'_s 为 $T=301(\text{K})$ 的反向饱和电流,由上式可得

$$I'_s \approx 1.08 I_s$$

即温度每升高 1°C , 反向饱和电流增至原值的约 1.08 倍。近似地认为在 27°C 至 127°C 的温度范围内, 势垒和反向饱和电流随温度的变化保持这一规律。则当温度为 77°C 时, 相对 27°C 升高 50°C , 反向饱和电流

$$I_s|_{77^{\circ}\text{C}} = 0.01(1.08)^{50} = 0.47\mu\text{A}$$

当温度为 127°C 时, 相对 27°C 升高 100°C , 反向饱和电流

$$I_s|_{127^{\circ}\text{C}} = 0.01(1.08)^{100} = 22\mu\text{A}$$

I-1-5 将两个晶体二极管背靠背连接起来, 是否能构成一只晶体三极管, 为什么?

答: 不能。NPN 晶体三极管虽然可以看成是两个背靠背的二极管, 但两个二极管的正极是公用的, 两个二极管的连接处, 保持晶体结构的连续性。构成三极管的两个二极管公用正极的半导体层非常薄, 少数载流子的渡越时间很短, 只有极少部分复合掉。当我们把两个二极管背靠背连接起来时, 少数载流子由一个二极管的负极到达其正极, 还来不及到达另一个二极管的负极便全部复合掉, 因而其电流放大系数将等于零, 所以没有三极管放大作用这一基本功能。

I-1-6 如果说, 晶体管集电结的反向电压愈大, 对载流子吸引力愈大, 这就是集电极电流随集电结反向电压增大而增大的原因, 这种说法是否正确, 为什么?

答: 不正确, 因为集电结的反向电压, 全部降落在集电结的耗尽层, 而不能作用于基区的少数载流子来吸引它们。集电极电流的大小, 主要取决于基区靠近集电结截面的少数载流子的密度梯度, 而这一密度梯度主要取决于发射结的电压。集电结反向电压通过对基区宽度的改变, 使集电极电流产生很微小的变化。

I-1-7 如果说, 晶体管进入饱和区后, 由于集电结加有正向电压, 故载流子由基区通过集电结进入集电区运动的过程中受到了阻力。这就是晶体管进入饱和区后, 集电极电流减小的原因。这种说法是否正确, 为什么?

答: 不正确。晶体管进入饱和区后, 虽然集电结加上了正向电压。但集电结势垒区的势垒电压只是减小而并未消失。这一剩余势垒电压对基区的少数载流子经集电结势垒区进入集电区时, 是起加速作用, 而不是起阻碍作用。集电极电流减小的原因是由于集电结势垒降低后, 集电区的多数载流子大量地越过集电结势垒层进入基区所致。

I-1-8 不忽略两个 PN 结本征激发产生的少数载流子形成的电流, 也不忽略基区多数载流子向发射区扩散所形成的电流。通过一个 NPN 管管内电流的全电流图, 标明电流的流向, 写出 I_E 、 I_B 和 I_C 的表示式。

解: 各电流的符号和特点如下:

I_{EnD} ——自由电子从发射区进入基区的扩散电流。

I_{BnD} ——自由电子从发射区进入基区的扩散电流被复合的那一部分。

I_{EnD} ——自由电子从发射区进入基区的扩散电流未被复合进入集电区的那一部分。

I_{BnD} ——基区空穴扩散至发射区的电流。

I_{BnD} ——基区本征激发产生的电子进入发射区形成的反向饱和电流。

I_{BnD} ——发射区本征激发产生的空穴进入基区形成的反向饱和电流。

I_{BnD} ——集电区本征激发产生的空穴进入基区形成的反向饱和电流。

I_{BnD} ——基区本征激发产生的电子进入集电区形成的反向饱和电流。

以上为晶体管处于放大状态下的全部电流。

图 I-1-2 示出电流流向的图形。

$$I_E = I_{EaD} + I_{BEP} - I_{BBa} - I_{EBP}$$

$$I_C = I_{CaD} + I_{CBP} + I_{BCa}$$

$$I_B = I_{BaD} + I_{BEP} - I_{BBa} - I_{EBP} + I_{CBP} + I_{BCa}$$

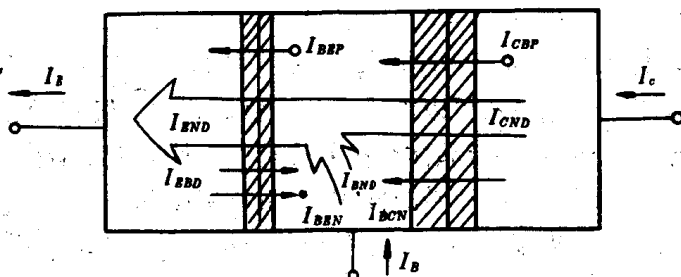


图 I-1-2

I_B 中的 I_{BBa} 和 I_{EBP} 无放大作用。

$$I_C = \beta(I_{BaD} + I_{BEP} + I_{CBP} + I_{BCa})$$

I-1-9 晶体三极管的集电结反向电阻(集电结反向电压变化与相应的电流变化之比)和一个二极管的反向电阻有何不同?

答:晶体三极管集电结处于反向电压作用下,流过集电结的电流不仅是集电结的反向饱和电流,还有从发射极扩散过来的电流。当集电结反向电压变化时,将改变发射极扩散过来的电流,因而它与二极管的反向电阻不同,其值比二极管反向电阻小得多,而且与发射结正向电压有关,发射结正向电压越大,集电结反向电阻越小,大致与集电极电流成反比。

I-1-10 当基极与发射极相短接时,如图 I-1-3(a),此时流过晶体管的电流为 I_{CIS} 。当基极与发射极之间接有电阻 R 时,如图 I-1-3(b),此时流过晶体管的电流为 I_{CER} 。试解释:

$$I_{CBO} < I_{CIS} < I_{CER} < I_{CEO}$$

解:图 I-1-4 画出了基极和发射极之间接有电阻 R ,并画出了基区体积电阻 r_w ,以及晶体管内部电流、电压关系示意图。由图可见, I_{CER} 分成两部分,一部分为 I_E ,另一部分为 I_B 。 I_B 流过 r_w 和 R 所产生的电压是使基区 B' 点电位高于发射极 E 。这样,发射结便加上了一个正向电压,由于此正向电压作用的结果,便造成发射结有扩散电流。这一扩散电流成为集电极电流的一部分,并且取决于 $B'E$ 之间的电压。十分明显,当电阻 $R=0$ 时, $B'E$ 之间的电压比 $R \neq 0$ 时要小,从而集电极电流减小,故有 $I_{CIS} < I_{CER}$ 。当基极开路时, $R \rightarrow \infty$, U_{BE} 最大,故 $I_{CBO} > I_{CER}$ 。而当外加反向电压作用于 CB 之间时, $U_{BE}=0$,此时电流为 I_{CBO} ,故 $I_{CBO} <$

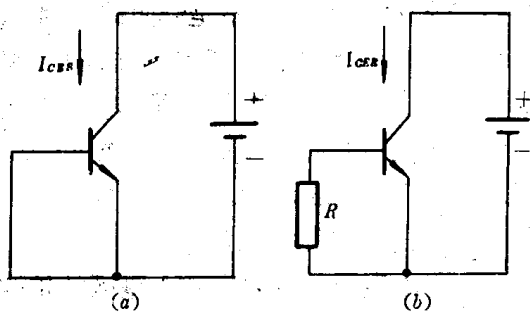


图 I-1-3

I_{CES} 。综上所述,可得

$$I_{CBO} < I_{CES} < I_{CER} < I_{CEO}$$

I-1-11 图 I-1-3(a) 连接情况下的击穿电压为 BU_{CES} , 图 I-1-3(b) 连接情况下的击穿电压为 BU_{CER} 。试解释

$$BU_{CBO} > BU_{CES} > BU_{CER} > BU_{CEO}$$

答:集电结击穿一般为雪崩击穿。其机理是:通过集电结势垒区的载流子,在集电结电场的作用下,获得足够的能量,将势垒区晶格中的价电子碰撞出来,引起连锁反应,使电流突增而出现击穿现象。如果势垒区的原始电子越多,碰撞概率也就越大,则电流突增至一定值所需的集电结电压也越小。即击穿电压越小。上题已说明

$$I_{CBO} < I_{CES} < I_{CER} < I_{CEO}$$

故有

$$BU_{CBO} > BU_{CES} > BU_{CER} > BU_{CEO}$$

I-1-12 给你一只万用表,如何判断一个晶体管是 NPN 管或 PNP 管,并分辨出三个电极来。

答:首先我们要明确以下几点:

1. 万用表量程置于欧姆档时,“+”端——红表笔输出电压的极性为负极,而“-”端——黑表笔输出电压的极性为正极。
2. 基极可以视为发射结和集电结两个 PN 结的公共电极。以基极固定于某一测试表笔,而将另一表笔分别和另两个电极相连。当测得电阻阻值很低时,表示两个结均被加上正向电压,反之,被加上反向电压。
3. 三极管处于放大状态的 β 值,远比处于倒置状态的 β 值大。

根据上述 1、2 两条原理,可以将红表笔和黑表笔先后固定到三极管的某条引脚。若(用 $\times 1k$ 档)测得该腿和另两条腿之间有低欧姆电阻,则该引脚即为基极,如果连基极的表笔为红色,则该管为 PNP 管,若为黑色,则该管为 NPN 管。然后根据上述 1、3 两条原理区分余下两条腿哪个是发射极,哪个是集电极。其方法是:

对 NPN 管,将红、黑表笔分别和待判别的两个电极相连接,在黑表笔所连电极和已判明的基极之间接一个 $10k$ 左右的电阻,意味着加一偏流,观察电表指示欧姆值的大小,在调换表笔的两次测量中,加偏流后电表指示欧姆值小,则意味着此种连接情况下的 β 值大,黑表笔所接电极为集电极。

对 PNP 管,方法与上述相似,只是偏流电阻接于红表笔所接电极和已判明的基极引脚之间。

I-1-13 有一种说法,用万用表测量晶体三极管 CE 间电阻(B 开路),等于分别测量 CB 间电阻(E 开路)和 BE 间电阻(C 开路)之和,是否正确。

答:这种说法不正确,因为 CE 间的等效电阻是与 BE 间的电压有关的。单独测 CB 间电阻(E 开路), BE 间没有电压, E 结无扩散电流。而当测 CE 间电阻(B 开路)时, BE 间加有正向

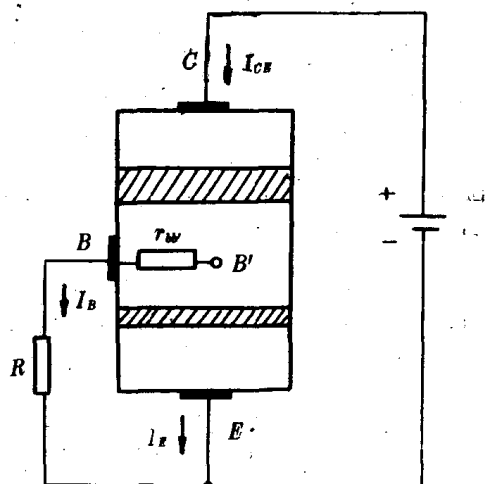


图 I-1-4