

模拟电子电路

许开君 黄重高 主编

牟 真 夏道智 编

1.1

宁夏人民出版社

内 容 提 要

本书共九章,内容包括:晶体管及其基本放大电路、负反馈放大电路、场效应管及其放大电路、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。

本书物理概念清楚、注意理论联系实际、各章都有一定数量的例题、习题与思考题,书后附有各章中英名词对照和有关半导体器件及集成电路参数的附录。

本书可供高等院校、职工大学、业余大学和电视大学的精密机械、光学仪器、计量仪器、真空设备与测量、精密仪器、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作为教材,也可供其他有关技术人员学习和参考。

模拟电子电路

许开君 黄重高 主编
牟 真 夏道智 编

宁夏人民出版社 出版

(银川市解放西街105号)

上海高机书店 发行

(上海市复兴中路1195号)

电子工业部第十四研究所印刷厂

开本: 787×1092 1/16

印张:17.25 字数: 400,000

1987年7月第1版第1次印刷

印数:1——10000册

ISBN7-227-00105/TN·1

定价: 3.55元

统一书号: 15157·23

前 言

《电路与电机》、《模拟电子电路》、《数字电子电路》这套教材是按高等院校工科机械专业电工学150学时教学大纲,并结合精密机械、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要求编写的。可作为有关专业180学时左右的教学用书。整个教材由机械工业部电工学协作组组织编写,作为部属高校有关专业试用教材。《模拟电子电路》经八所高等院校试用四遍后,效果反映良好。编者在广泛听取各院校任课教师的意见后,对原铅印本教材又进行了修订。

为适应电子技术迅速发展的形势,《模拟电子电路》教材在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,着重加强了以集成运放为主的模拟集成电路的功能、原理和应用;为便于教学、有利于培养学生的自学能力和分析问题的能力,书中编写了自学内容和供选学的参考内容,任课教师可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、实例以及思考题与习题,书后附有各章中英名词对照。

《模拟电子电路》共有九章。由陕西机械学院的许开君和沈阳工业大学的黄重高主编。第一章由沈阳工业大学的牟真编写并修订,二、三章由黄重高编写并修订,四、五、六章由许开君编写并修订,七、八、九章由陕西机械学院夏道智编写并修订。

本书由合肥工业大学郎璧云同志主审。参加审稿的高校有合肥工业大学、上海机械学院、湖南大学、东北重型机械学院、吉林工业大学、甘肃工业大学、哈尔滨科技大学、上海水产大学、哈尔滨电工学院、安徽工学院、江苏工学院、山东纺织工学院、太原重型机械学院、河北机电学院、广东机械学院、洛阳工学院、海军航空工程学院、武汉工学院、内蒙古工学院、沈阳工业大学、陕西机械学院等二十一所高等院校。在评审中各兄弟院校提出了不少宝贵意见,使编者在进一步修订时能有所遵循。在此我们谨向兄弟院校的同志致以诚挚的谢意。

《模拟电子电路》修订后的初稿,曾由西安交通大学沙峰副教授和王耀光副教授审阅过,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

上海机械学院方德政副教授在本书的编写过程中做了大量的组织工作,并参加了本书的审稿会议,提出了不少宝贵意见,在此深表感谢。

由于我们水平所限,本书必然还存在不少缺点和错误,热诚希望使用本教材的教师和读者给予批评指正。

编 者 一九八七年四月

《模拟电子电路》目录

第一章 晶体管及其基本放大电路

1—1 PN结与半导体二极管	(1)
一、PN结	(1)
二、半导体二极管	(2)
1、二极管的伏安方程	(2)
2、二极管的伏安特性曲线	(3)
3、二极管的电阻	(3)
4、二极管的电容效应	(4)
5、二极管的主要参数	(4)
6、二极管的线性模型与二极管 电路的分析	(4)
1—2 半导体三极管	(6)
一、半导体三极管的构造与工作 原理	(6)
二、晶体管特性曲线	(7)
三、晶体管的主要参数	(9)
四、晶体管的参数与温度的关系	(10)
1—3 基本放大电路	(10)
一、放大电路的静态	(11)
二、放大电路的动态	(11)
三、放大电路中的文字符号	(12)
四、使用一个直流电源的基本放 大电路	(13)
1—4 放大电路的主要技术参数	(13)
一、放大倍数	(13)
二、输入电阻 r_i	(13)
三、输出电阻 r_o	(14)
1—5 基本放大电路的分析方法之 ——图解法	(14)

一、静态分析	(14)
二、动态分析	(15)
三、用图解法分析基本放大电路 的性能	(17)
1—6 放大电路的分析方法之二 ——微变等效电路分析法	(19)
一、晶体管的小信号模型	(19)
二、应用晶体管的微变参数等效 电路分析放大电路	(20)
三、放大电路频率特性的基本概 念	(24)
1—7 稳定静态工作点的典型电路 ——分压式射极偏置电路	(25)
1—8 共基极放大电路	(28)
一、共基极放大电路的工作原理	(28)
二、共基极放大电路分析	(28)
1—9 共集电极放大电路	(30)
一、共集电极放大电路的动态分 析	(30)
二、共集电极放大电路的应用	(32)
1—10 阻容耦合多级放大电路	(33)
一、阻容耦合放大电路简述	(33)
二、阻容耦合放大电路分析	(33)
* 1—11 晶体管的混合 π 型微变等 效电路和频率特性	(36)
一、晶体管的混合 π 型微变等效	

电路.....	(36)	二、输入电阻和输出电阻.....	(61)
二、晶体管共射接法电流放大系		三、通频带.....	(63)
数的频率响应特性.....	(37)	四、非线性失真.....	(63)
三、晶体管的频率参数.....	(40)	* 2—5 反馈放大电路的自激及消	
* 1—12 共射基本放大电路的频		除.....	(63)
率响应特性分析.....	(40)	一、自激的条件.....	(64)
一、简单的RC低通和高通网络		二、稳定性分析举例.....	(64)
的传递函数.....	(40)	三、高频自激的消除.....	(66)
二、放大电路的频率响应特性...		思考题与习题.....	(68)
.....	(41)	第三章 场效应管及其基本电路	
* 1—13 共基极放大电路的频率		3—1 结型场效应管.....	(71)
特性及共基放大电路的		一、结构及符号.....	(71)
应用简介.....	(47)	二、工作原理.....	(72)
一、共基极放大电路的频率特性		三、特性曲线.....	(73)
.....	(47)	3—2 绝缘栅场效应管.....	(75)
二、共基极放大电路的应用.....	(47)	一、增强型绝缘栅场效应管.....	(75)
思考题与习题.....	(47)	二、耗尽型绝缘栅场效应管.....	(76)
第二章 负反馈放大电路		3—3 场效应管的主要参数.....	(77)
2—1 反馈的基本概念.....	(56)	* 3—4 VMOS功率场效应管.....	(79)
一、放大电路中的反馈.....	(56)	一、结构及工作原理.....	(79)
二、反馈放大电路的组成.....	(57)	二、特性曲线和特点.....	(79)
三、反馈的分类.....	(57)	三、国产VMOS管的命名.....	(80)
2—2 反馈放大电路的类型.....	(57)	3—5 场效应管放大电路.....	(80)
一、反馈放大电路的类型.....	(57)	一、场效应管的直流偏置电路...	(80)
二、反馈放大电路的判别.....	(59)	二、场效应管的微变等效电路...	(83)
2—3 反馈放大电路的基本关系		三、场效应管放大电路的动态估	
式.....	(59)	算.....	(83)
一、开环增益和反馈系数.....	(60)	* 3—6 场效应管的其他应用.....	(88)
二、闭环增益.....	(60)	一、场效应管恒流源.....	(88)
2—4 负反馈对放大电路性能的		二、场效应管压控电阻.....	(89)
影响.....	(60)	思考题与习题.....	(89)
一、增益.....	(60)	第四章 直流放大器和模拟集成电路	

4—1	直接耦合放大电路的一般问题	(92)
一、	直接耦合电路级间静态工作点的配置问题	(92)
二、	零点漂移及其危害	(95)
三、	产生零漂的主要因素和解决零漂的办法	(96)
4—2	差动放大电路	(96)
一、	基本差动放大电路	(96)
二、	典型差动放大电路	(99)
三、	具有恒流源的差动放大电路	(101)
四、	差动放大电路的输入输出方式	(103)
*4—3	差动放大电路的传输特性	(105)
4—4	模拟集成电路	(108)
一、	概述	(108)
二、	集成运算放大器的基本单元电路	(108)
三、	集成运算放大器F007(内补偿型)电路分析	(111)
四、	集成运算放大器的主要参数	(113)
五、	集成运算放大器的外部引线和符号	(115)
*4—5	调制型直流放大器简介	(116)
一、	调制器的基本工作原理	(117)
二、	解调器的基本工作原理	(118)
	思考题与习题	(119)
第五章 集成运算放大器的应用		
5—1	模拟信号的运算电路	(122)

一、	反相输入运算电路	(122)
1	反相比例运算电路	(122)
2	反相加法运算电路	(123)
3	反馈网络为T型电阻网络的运算电路	(124)
二、	同相输入运算电路	(125)
1	同相比例运算电路	(125)
2	同相加法运算电路	(126)
三、	差动输入运算电路	(126)
*四、	交流比例运算电路	(128)
五、	积分运算电路	(129)
1	基本的积分运算电路	(129)
2	求和积分电路	(130)
六、	微分运算电路	(131)
1	基本的微分运算电路	(131)
2	改进型的微分运算电路	(131)
七、	对数和反对数运算电路	(132)
1	对数运算电路	(132)
2	反对数运算电路	(132)
八、	模拟乘法器	(133)
1	对数乘法器原理	(133)
2	差动放大器的跨导及电压增益与跨导的关系	(133)
*3	四象限乘法器	(135)
5—2	信号处理电路	(135)
一、	电压比较电路	(136)
1	基本比较电路	(136)
2	电平检测比较电路	(136)
3	施密特电路	(137)
*4	双限比较电路	(138)
二、	精密二极管整流电路	(139)
*三、	采样保持电路和峰值检波电路	(140)
四、	有源滤波电路	(141)
1	低通滤波电路	(141)
*2	高通滤波电路	(145)
*3	带通滤波电路	(146)

* 4 带阻滤波电路	(147)
5—3 信号产生电路	(148)
一、方波产生电路	(148)
二、矩形波产生电路	(149)
* 三、三角波产生电路	(150)
* 四、锯齿波产生电路	(151)
* 5—4 信号测量电路	(151)
一、电阻应变片转换成电信号的 测量电路	(152)
二、光电器件转换成电信号的测 量电路	(152)
三、压电器件转换成电信号的测 量电路	(154)
* 5—5 有源校正电路	(155)
一、比例—积分校正电路	(155)
二、比例—微分校正电路	(156)
三、比例—积分—微分校正电路	(156)
* 5—6 应用举例: 定性分析 SJZ8-3单晶炉自动控温 系统部分电路	(157)
* 5—7 集成运算放大器在实际应 用中的一些问题	(160)
一、参数测试	(160)
二、调零	(161)
三、消除自激振荡	(161)
四、保护措施	(162)
五、集成运算放大器性能的扩展	(162)
六、单电源供电	(164)
思考题与习题	(164)

第六章 正弦波振荡电路

6—1 概述	(169)
一、正弦波振荡的条件	(169)
二、振荡的建立和振幅的稳定	(170)
6—2 RC正弦波振荡电路	(170)
一、RC串并联选频网络	(171)
二、RC串并联选频网络的振荡 电路	(172)
* 三、双T网络振荡电路	(173)
* 四、RC移相式振荡电路	(175)
6—3 LC振荡电路	(175)
一、LC并联回路的特性	(175)
二、变压器反馈式振荡电路	(176)
三、电感反馈式振荡电路	(177)
四、电容反馈式振荡电路	(178)
6—4 石英晶体振荡电路	(179)
一、石英晶体的特性、符号及等 效电路	(180)
1 压电效应	(180)
2 符号及等效电路	(180)
二、石英晶体振荡电路	(181)
1 并联型晶体振荡电路	(181)
2 串联型晶体振荡电路	(182)
思考题与习题	(182)

第七章 功率放大电路

7—1 概述	(186)
一、功率放大电路的特点和要求	(186)
二、功率放大电路的分类	(187)
7—2 单管甲类功率放大电路	(187)
7—3 乙类互补对称功率放大电 路	(188)
7—4 甲乙类互补对称功率放大 电路	(191)

一、电路的工作原理和存在问题	(191)
二、准互补对称功率放大电路	(192)
三、单电源互补对称功率放大电路	(192)
7—5 功率晶体管的散热和保护	(193)
一、晶体管的散热	(193)
二、晶体管的保护	(194)
7—6 集成功率放大电路	(194)
*7—7 VMOS功率场效应管的功率放大电路	(195)
思考题与习题	(197)
第八章 直流稳压电源	
8—1 单相桥式整流电路	(199)
*8—2 三相桥式整流电路	(201)
8—3 滤波电路	(203)
一、电容滤波电路	(204)
二、电感滤波电路	(205)
三、 π 型滤波电路	(206)
8—4 稳压二极管及其稳压电路	(207)
一、稳压二极管	(207)
二、稳压二极管稳压电路	(207)
8—5 串联型稳压电路	(210)
*8—6 集成稳压电路	(212)
8—7 W7800系列三端固定式集成稳压电路的应用	(215)
8—8 集成稳压电路的主要参数	(217)
思考题与习题	(218)

第九章 晶闸管电路

9—1 晶闸管	(223)
一、晶闸管的结构和工作原理	(223)
二、晶闸管的伏安特性	(224)
三、晶闸管的主要参数	(225)
9—2 单相可控整流电路	(226)
一、单向半波可控整流电路	(226)
1 电阻性负载	(226)
2 电感性负载	(228)
一、单相半控桥式整流电路	(229)
1 电阻性负载	(229)
2 电感性负载	(231)
3 反电势负载	(233)
9—3 晶闸管的保护	(233)
一、过电压保护	(233)
二、过电流保护	(234)
9—4 单结晶体管触发电路	(235)
一、晶闸管对触发电路的要求	(235)
二、单结晶体管的结构和伏安特性	(235)
三、单结晶体管的振荡电路	(237)
四、单结晶体管的触发电路	(238)
*9—5 晶闸管逆变电路	(240)
9—6 晶闸管电路应用举例	(241)
一、晶闸管开关电路	(241)
二、晶闸管直流调速电路	(242)
思考题与习题	(244)

参考文献

附录

附录一、半导体器件型号命名方法	(246)
附录二、常用半导体器件的参数	(247)

附录三、集成电路型号命名.....(255)	附录六、集成功率组件5G31的主
附录四、国内外集成运放同类产品	要参数.....(259)
型号对照表.....(256)	附录七、集成稳压组件参数表.....(260)
附录五、几种国产集成运算放大器	中英名词对照.....(261)
参数规范表.....(257)	主要参考书目.....(266)

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、三极管和由分立元件组成的基本放大电路。

对于元件，是从PN结的物理结构和电性能开始介绍的，但重点是元件的端口特性。

对放大电路，本章介绍了基本原理、分析方法，并讨论了几种主要的性能参数，分析了影响性能的因素和改善性能的措施。

1-1 PN 结与半导体二极管

一、PN结

在半导体中，参与导电的有两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。在N型半导体中，自由电子是多数载流子（以后简称多子），空穴是少数载流子（以后简称少子）。在P型半导体中，空穴是多子，自由电子是少子。

如果通过掺杂使一块半导体的一侧形成P型半导体，另一侧形成N型半导体，则由于在两种异型掺杂半导体的交界处存在着载流子浓度的突变，P区的多子空穴和N区的多子自由电子将分别向对侧扩散，并彼此复合，因而形成了扩散运动。交界处的P型区因失去空穴而留下了不能迁移的负离子，N型区则因失去电子而留下不能迁移的正离子，结果交界面的两侧分别形成了两个带有不能迁移的负、正电荷的带电区域，这一区域就叫做PN结，也称做空间电荷区。PN结示意图如图1—1所示。由空间电荷区形成的电场称做内建电场。

内建电场的方向与多子扩散电流的方向相反，起着阻碍多子扩散的作用，但却推动两侧的少子（P区的自由电子和N区的空穴）向对侧漂移而形成漂移电流。

PN结开始形成时，扩散电流远大于漂移电流，因此随着扩散的进行，PN结（空间电荷区）会逐渐加厚，内建电场逐渐增强，使扩散电流逐渐减少。当PN结（空间电荷区）加厚至一定程度时，扩散电流减少到与漂移电流相等，形成了动态平衡，这时PN结的厚度即不再增加。PN结的相对稳定的厚度一般为微米数量级。此时由于多子的扩散电流与少子的漂移电流大小相等，方向相反，所以其作用互相抵消，在外部不显示电流的现象。

在空间电荷区内，多数载流子因扩散、复合而减少到远少于两侧的中性掺杂区。因此，这里的载流子数极少，电阻率远大于两侧的中性区。空间电荷区又称为载流子耗尽区。

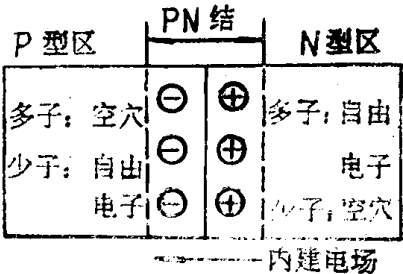


图1—1 PN结（空间电荷区）示意图

在含有PN结的半导体块两侧施加电压，PN结（空间电荷区的厚度）将因外电场的作用而发生变化。

如果外加电压使N区电位高于P区电位，称PN结为反向偏置。这时外电场的方向与内建电场方向相同，多子扩散电流被进一步削弱，PN结厚度增加，半导体块内出现不平衡的少子漂移电流。由于少子的浓度只决定于外部的激发条件，如果外加电压不是过大，当外部激发条件不变时，少子浓度将基本不变，故这一电流的大小与外加电压基本无关，所以称为反向饱和电流，其值极小，往往可略。可以近似认为这时PN结不导通（通常称为截止）。因为PN结截止时电阻率极大，所以加在半导体块上的反偏电压将全部降落在PN结上。

当外加电压使P区电位高于N区时，这样的外加电压称为正向偏置。这时外电场方向与内建电场方向相反，PN结厚度变小，多子的扩散电流增大，半导体块内出现不能被少子漂移电流平衡的多子扩散电流，其值由正偏电压的大小决定，这种现象称为PN结导通。这时PN结电阻率下降很多。

PN结的这种正偏导通，反偏截止的电性能称为单向导电性。

二、半导体二极管

半导体二极管是将一块内部加工成一个PN结的半导体块（常用的为硅、锗两种材料）封装起来，两端接出引线（电极）制成的。接在P区一端的引线称为阳极（A），接在N区一端的引线称为阴极（K）。国标规定的文字符号为D，图形符号为A—►|—K。

1. 二极管的伏安方程

半导体二极管的电性能主要由内部的PN结决定，具有正偏导通、反偏截止的单向导电性。可以证明（证明从略），其定量的伏安关系近似为：

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中， $V_T = \frac{kT}{q}$ ，称为温度电压当量，其中 k 为波尔兹曼常数，其值为 1.38×10^{-23} （焦/K）； q 为电子所带的电量，其值为 1.60×10^{-19} （库）； T 为温度（单位为K），故 $V_T = \frac{T}{11600}$ （V），在室温（300K）时， $V_T = 0.026$ （V）= 26（mV）。

在二极管承受反偏电压时， V 为负值，一般情况下有 $|V| \gg 0.026$ （V）， $\exp(V/V_T) \approx 0$ ，故得：

$$I = -I_s \quad (1-2)$$

可见式（1—1）中的 I_s 就是二极管的反向饱和电流，其典型值，硅管约为纳安（nA，即 10^{-9} A）数量级，锗管约为微安（ μ A，即 10^{-6} A）数量级。

在二极管承受正偏电压时，通常 $V \gg 0.026$ （V）， $\exp(V/V_T) \gg 1$ ，故得：

$$I = I_s \exp \frac{V}{V_T} \quad (1-3)$$

即二极管电流随正偏电压按指数规律变化。

根据实际的二极管测出的伏安关系与式（1—1）有一定的差异，这主要表现在以下两

个方面:

(1) 二极管反偏时, 如果反偏电压过大, 半导体中的少子将因强电场的激励而剧增, 另外, 强电场也可能使载流子获得大动能, 此载流子再与束缚电子碰撞时, 使束缚电子激发成为自由电子, 这两种原因都将导致半导体内电流急剧增大而不再等于 I_s , 这种现象叫做“击穿”。

(2) 二极管正偏时, 如果正偏电压很小, PN结厚度所受影响很小, 实际的电流将远小于按式 (1—1) 计算出的结果, 这时二极管并不呈现明显的导通状态。当正偏电压较大时, PN结电阻减小, 两侧中性掺杂区的电阻将不能忽略, 甚至可能成为影响电流的主要因素, 这时二极管的伏安关系将更接近于线性。

所以式 (1—1) 只是在电压不过小也不过大时才能比较准确表示二极管的伏安关系。

2. 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安关系也常常用曲线表示, 这叫做伏安特性曲线。图 1—2 是实际测出的典型的伏安特性曲线 (为清楚起见, 曲线中横坐标轴 (V 轴) 的正反方向采用了不同的标度)。可以看出, 当电压过小或过大时, 曲线显示出与式 (1—1) 计算结果的差异。实际上不同型号的二极管, 其伏安特性曲线也各不相同, 而且由于二极管特性的分散性很大, 即使同一型号的管子, 其伏安曲线也不尽相同。在应用时, 如果需要得出准确的结果, 往往要实测出具体元件的特性曲线。

下面分析图 1—2 所示的典型伏安特性曲线反映的规律。

在第一象限中的曲线显示的是二极管正偏时的关系, 大致可分为两段。

由坐标原点 O 到 a 点为第一段。其特征是电流极小, 这表明由于正偏电压过低, 二极管并未呈现明显的导通状态, 这一区域通常称为死区, 对应 a 点的电压 V_T 称为开启电压或死区电压, 其数值随二极管而异, 也受温度的影响, 一般硅管的死区电压约为 $0.4 \sim 0.5V$, 锗管约为 $0.1V$ 。

过 a 点后为第二段。在电压 V 较小时, 曲线是式 (1—1) 决定的指数曲线, 在电压较大时, 曲线逐渐近似为斜率很大的直线, 这时很小的电压变化也会导致电流的强烈变化, 或者说即使电流变化很大, 电压也只有很小的变化。一般硅管在这一段的电压变化范围约为 $0.6 \sim 1.0V$, 锗管约为 $0.2 \sim 0.4V$ 。

第三象限的曲线是二极管反向偏置时的伏安曲线, 大致可分为两段: 从 O 到 b 点, 电压的绝对值虽然增加很多, 反向电流却基本保持不变, 这个电流就是反向饱和电流, 其数值极小。 b 点以后, 电流急剧增大, 而电压变化极小, 这是击穿现象。对应 b 点的电压称为反向击穿电压, 记为 V_{BR} 。二极管击穿后, 如果电路没有限流措施, 反向电流将增至很大, 会使二极管烧毁。

3. 二极管的电阻

二极管是非线性元件, 静态电阻不是常数, 阻值与工作点有关, 可以由伏安特性曲线的

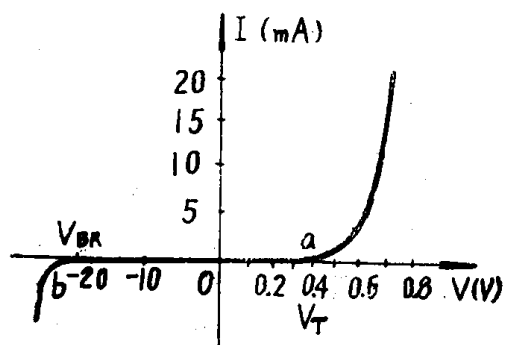


图1—2 半导体二极管的伏安特性曲线

斜率求出, 如图 1—3 所示。对应工作点Q可求得:

$$R_Q = \frac{V_Q}{I_Q} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_Q} \quad (1-4)$$

根据伏安特性曲线也可求得动态电阻, 如对应Q点有:

$$r_Q = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{dV}{dI} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (1-5)$$

即动态电阻等于伏安特性曲线在工作点上的切线的斜率的倒数。可以看出, 动态电阻也不是常数, 阻值与工作点有关。当正向电流较大时, 由于伏安曲线近似为直线, 各点斜率相等, 故 r 基本不变, 其值很小。

动态电阻也可由伏安方程求出, 即

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_Q} &= \frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} [I_S (e^{\frac{V_Q}{V_T}} - 1)] \\ &= \frac{I_S e^{\frac{V_Q}{V_T}}}{V_T} = \frac{I_Q}{V_T} \end{aligned}$$

$$\therefore r_Q = \frac{V_T}{I_Q} = \frac{0.026(V)}{I_Q(A)} = \frac{26(\text{mV})}{I_Q(\text{mA})} \quad (1-6)$$

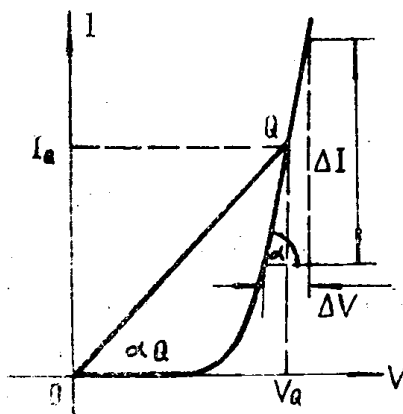


图1—3 二极管的静态工作点与动态电阻

4. 二极管的电容效应

将二极管与电容器相比较, 会发现它们有很多相似处。如二极管PN结内载流子极少, 电阻率很高, 这相当于电容器内的电介质; PN结两侧掺杂区电阻率很小, 这相当于电容器两侧的金属极板。所以, 这一点二极管(PN结)与普通的平行板电容器十分相似。在外加电压的作用下, 二极管也会产生与充电放电相似的过程, 这种由PN结产生的电容效应称为结电容, 其值在0.5~100PF范围内。此外, 二极管正偏导通时还存在着一种由扩散电流形成的电容效应, 这称为扩散电容, 其值在几十PF至0.01PF范围内。结电容与扩散电容之和称为极间电容, 极间电容是非线性电容, 其值随外加电压而变。极间电容数值很小, 在低频激励下, 可以忽略, 但在高频激励下, 会产生不可忽视的影响。

5. 二极管的主要参数

二极管的主要参数有以下几种:

(1) 最大整流电流 I_{GM} : 指管子长期运行时允许通过的最大正向平均电流值。

(2) 最大反向工作电压 V_{RM} : 指管子运行时允许承受的最大反向电压, 一般约为击穿电压 V_{BR} 的二分之一或三分之二。

(3) 反向电流 I_R : 指在室温条件下, 管子反向运用时(未被击穿)电流的大小, 这是二极管的重要性能参数, 数值越小, 管子性能越好。

6. 二极管的线性模型与二极管电路的分析

二极管是非线性元件, 因此对含有二极管的电路进行定量分析是比较困难的。为了简化分析过程, 在计算精度允许的情况下, 常常用理想二极管来模拟实际二极管。理想二极管是将实际二极管伏安特性理想化后得到的电路模型, 它的伏安特性是: 正偏时电压为0(不存

在正向压降)，反偏时电流为 0（无反向电流），即：

$$I > 0 \text{ 时, } V = 0$$

$$V < 0 \text{ 时, } I = 0$$

图 1—4(a)中的粗实线为理想二极管的伏安曲线。可见用理想二极管模拟实际二极管时，正向压降将有不到 1 伏的误差。如果含有二极管的支路的总电压远大于 1V，则用理想二极管代替实际二极管后，计算的误差将小至可以忽略。图 1—4(b)为理想二极管的电路图形符号。

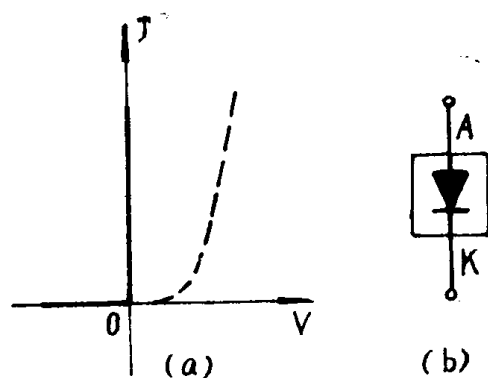


图1—4 理想二极管的伏安特性及其电路图形符号

在利用上述电路模型来分析二极管电路时，首先应判断出加在二极管两端的电压的方向，如果二极管正偏，则理想二极管可视为“短路”；如果二极管反偏，则理想二极管可视为“断路”。

〔例 1—1〕 在图 1—5(a)中，设 D 为理想二极管，当输入电压 v_i 为图(b)所示的正弦波时，试绘出输出电压 v_o 的波形。

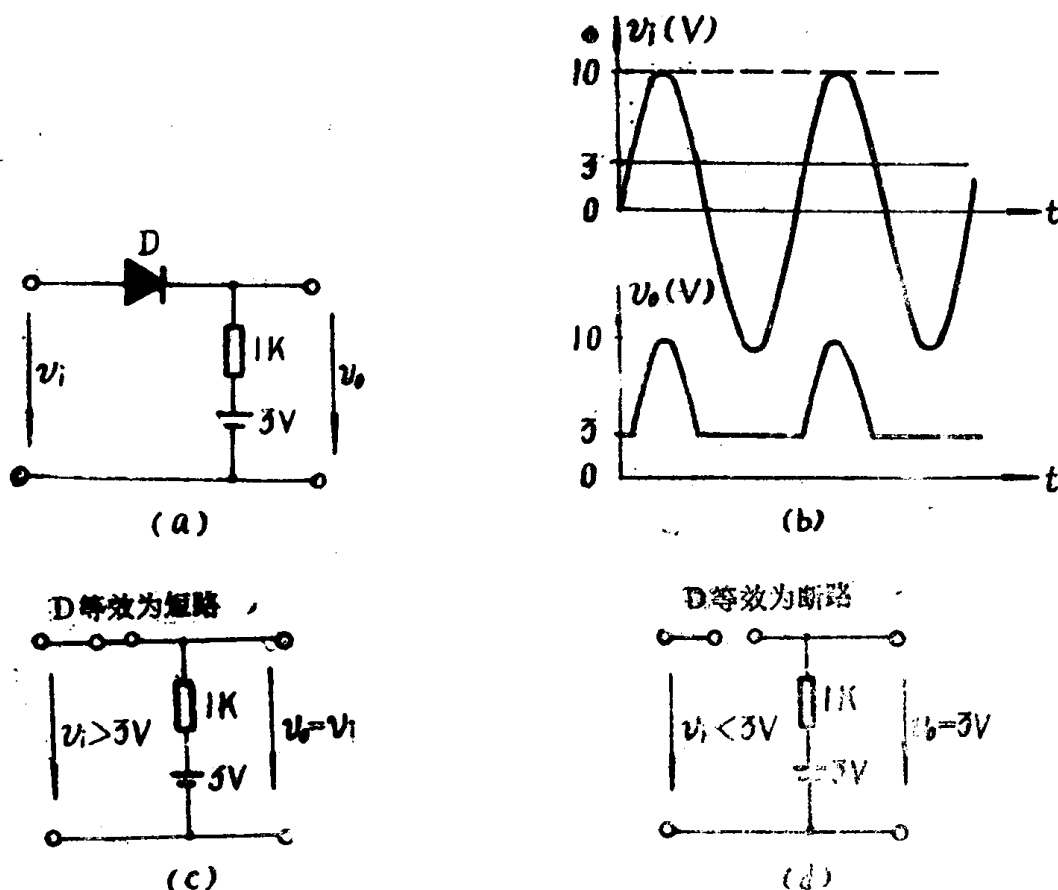


图1—5 例1—1图

解：首先应确定二极管导通还是截止。为此，可先假定二极管两端是断开的，在这一条件下，对应于 D 阴极处的电位为 3V，因此可知当 D 阳极电位高于 3V 时，二极管正偏导通，低于 3V 时，二极管反偏截止。

二极管导通时, 可视为“短路”, 电路如图(c)所示, v_o 的波形与 v_i 相同; 二极管截止时, 可视为“断路”, 如图(d)所示, 1K上端电位为恒定的3V, 由此可得出图(b)所示的 v_o 的波形。

从 v_o 的波形可知, 利用二极管的导通和截止, 将低于3V的 v_i 部分削去, 故这种二极管电路称为削波电路, 这里二极管起削波作用。利用不同的削波电路, 可以削去高于或低于基准电压的那部分波形, 以实现 v_i 的整形。

〔例 1—2〕 试分析图 1—6 中 v_o 的变化范围。 D_1 、 D_2 均为理想二极管, $V_2 > V_1$ 。

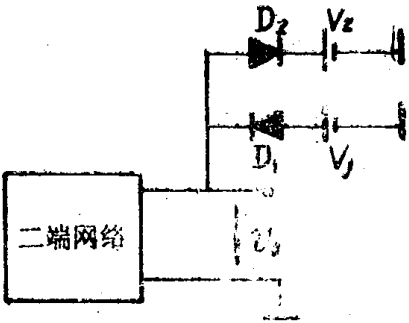


图1—6 例1—2图

解: 当 $v_o < V_1$ 时, D_1 导通, D_2 截止, 于是 $v_o = V_1$; 当 $v_o > V_2$ 时, D_1 截止, D_2 导通, 于是 $v_o = V_2$ 。

以上分析说明, D_1 钳住 v_o , 不让它下降到 V_1 以下; D_2 钳住 v_o , 不让它上升到 V_2 以上。故 v_o 只能在 $V_1 \sim V_2$ 之间变化。在这里二极管起“钳位”作用, 它使 v_o 的低限值为 V_1 , 高限值为 V_2 。

1-2 半导体三极管

一、半导体三极管的构造与工作原理

半导体三极管又称为晶体管, 它是由一块具有两个PN结的半导体封装在外壳内构成的。图 1—7 (a) 是其结构示意图。夹在两个PN结中间的区域称为基区, 该区掺杂浓度很小, 且极薄, 其厚度仅几个微米。由基区引出的电极称为基极, 记为B或b。基区两侧的半导体是

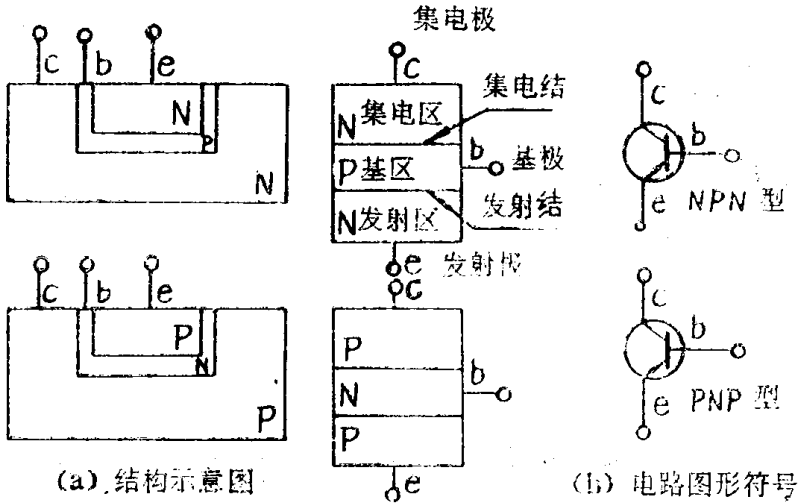


图1—7 半导体三极管

同型的，但掺杂浓度不同。与基区接触面积较小的区域掺杂浓度很大，称为发射区。从该区引出的电极称为发射极，记为 E 或 e。另一个区域掺杂浓度较小，称为集电区，由该区引出的电极称为集电极，记为 C 或 c。集电区与基区间的 PN 结称为集电结，发射区与基区间的 PN 结称为发射结。晶体管有 NPN 型和 PNP 型两种，其电路图形符号如图 1—7 (b) 所示。两种管子均可由硅材料或锗材料制成。由于它们的工作原理相同，下面仅以 NPN 型硅管为例进行讨论。

图 1—8 的电路中晶体管接成共发射极形式，电路含有两个回路，分别接有直流电源。 E_B 为发射结提供正向偏置电压。集电结的偏置电压是由 E_C 提供的。由于 E_C 一般大于 E_B ，使集电区电位高于基区，故集电结反偏。

发射结的正偏形成了多子扩散电流。由于发射区掺杂浓度远大于基区，故这一电流主要是由发射区扩散（注入）到基区的电子流。在晶体管外部则为发射极电流 I_E 。

因为基区薄，掺杂浓度很小，故发射区的电子注入到基区后，只有很少部分与基区的多子——空穴复合，形成很小的基极电流 I_B ($I_B \ll I_E$)。其余部分因扩散到达集电结附近，并为集电结的反向电场所吸引到达集电区，流入集电极，形成远大于基极电流的集电极电流 I_C 。

据图 1—8 标注的正方向，有：

$$I_E = I_C + I_B \tag{1-7}$$

由于 I_B 很小，所以 $I_E \approx I_C$ 。

晶体管工作时，除多子扩散形成的电流以外，还存在由集电结反偏形成的少子漂移电流。但其值很小，在计算时往往将其忽略。

二、晶体管的特性曲线

晶体管是非线性元件，其电极间的伏安关系通常用伏安特性曲线表示。在共射极接法中，B、E 极所在的回路称为输入回路，C、E 极所在的回路称为输出回路。B、E 极间的伏安关系曲线称为输入特性曲线，C、E 极间的伏安关系曲线称为输出特性曲线。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线与 PN 结的伏安特性曲线近似，二者的区别在于发射结两侧掺杂浓度相差很大。另外集电结的反偏电压为多子扩散电流提供了另一通路，且影响基极电流。图 1—9 是典型的输入特性曲线。它是 I_B 与 V_{BE} 、 V_{CE} 的函数关系曲线，即：

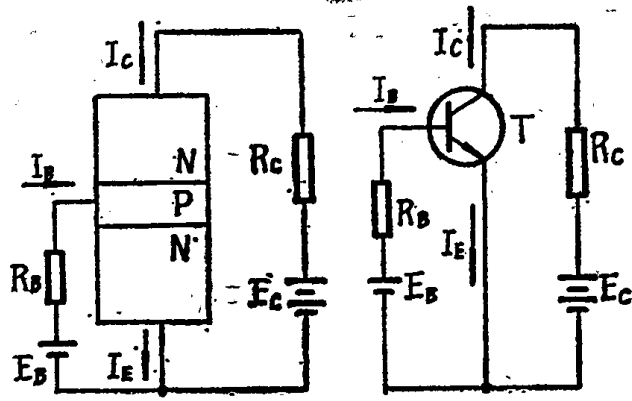


图1—8 接成共发射极形式的晶体管电路

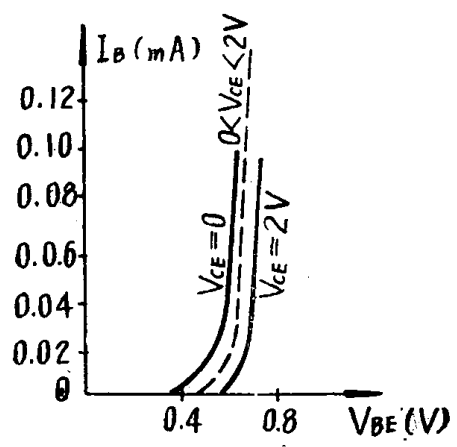


图1—9 晶体管的输入特性曲线

$$I_B = f(V_{BE}, V_{CE})$$

靠左边的一条曲线是 $V_{CE} = 0$ 时 I_B 与 V_{BE} 的关系曲线, $V_{CE} \neq 0$ 时, 随 V_{CE} 的增大, 曲线将逐渐向右移动, 当 V_{CE} 增至一定值后, 由于发射区注入基区的多子已绝大部分被吸引到集电区, 只要 V_{BE} 保持不变, 即使再增大 V_{CE} , I_B 也基本不再变化, 这一现象在输入特性曲线上表现为 V_{CE} 大于 2 伏以后曲线基本不再随 V_{CE} 的增加而变化。

根据输入特性曲线可以计算出 BE 极间的静态输入电阻 R_{BE} 和动态输入电阻 r_{be} , 计算方法与 1—1 节所述的计算二极管的电阻相同。动态输入电阻 r_{be} 是计算晶体管电路时经常用的重要数据, 常用公式 (1—6) 进行近似计算。式 (1—6) 中的 I_Q 在此就是晶体管的基极电流 I_{BQ} , 由于晶体管基区掺杂浓度很小, 基区体电阻较大, 不能忽略, 故 r_{be} 应为基区的体电阻 $r_{bb'}$ 和发射结动态电阻之和, 即:

$$r_{be} = r_{bb'} + \frac{26(\text{mV})}{I_{BQ}(\text{mA})} \quad (1-8)$$

对于低频小功率管, $r_{bb'}$ 可近似按 300Ω 计算, 大功率管或高频管的 $r_{bb'}$ 均有所减小。

2. 输出特性曲线

晶体管的输出特性曲线是指当 I_B 为某一固定值时, 集电极电流 I_C 与集射极间的电压 V_{CE} 之间的关系曲线, 当取不同的 I_B 值时, 可得一组输出特性曲线, 图 1—10 为 3DG6 的典型输出特性曲线。输出特性曲线可分为三个区域, 下面分别进行说明

(1) 截止区

截止区是对应于 $I_B = 0$ 的那条输出特性曲线以下的区域。对硅管而言, $V_{BE} < 0.5\text{V}$ 时, $I_B \approx 0$, 但是, 为了可靠截止, 通常使发射结零偏或反偏。晶体管截止的外部条件可以认为是发射结零偏 (或反偏) 和集电结反偏。在电路中晶体管截止时, 它所反映的外部特征为: $I_C \approx 0$, $V_{CE} \approx E_C$ 。

(2) 饱和区

饱和区是对应于输出特性曲线近似直线上升的部分 (见图 1—10)。在该区域, $|V_{BE}| > |V_{CE}|$, 因此晶体管饱和的外部条件是: 发射结正偏和集电结正偏。晶体管饱和时的外部特征为 $V_{CE} = V_{CES}$ (称为饱和压降) 很小。小功率硅管的 $V_{CES} \approx 0.3\text{V}$, 小功率锗管的 $V_{CES} \approx 0.1\text{V}$ 。由图 1—8 (b) 可以得到 $V_{CE} = E_C - I_C R_C$ 。由这一关系式可知, 当 E_C 一定时, 增大 I_C 或增大 R_C 都可以使 V_{CE} 减小, 均可使管子进入饱和区。

(3) 放大区

放大区是对应于输出特性曲线的平坦部分。晶体管处在放大状态的外部条件是发射结正偏和集电结反偏。管子处在放大状态的外部特征是 I_C 由 I_B 决定, 而与 V_{CE} 关系不大, 即 I_B 一定时, I_C 基本不变。也就是说晶体管在放大状态具有恒流的特性, 恒定电流 $I_C = \beta I_B$ 。

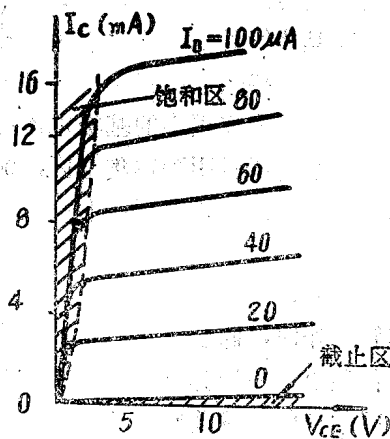


图1—10 晶体管的输出特性曲线