



电子与通信工程学科精品教程

模拟电子线路学习指导

主 编 张友纯

MONI DIANZI XIANLU



XUEXI ZHIDAO



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



电子与通信工程学科精品教程

模拟电子线路学习指导

副主编 甘 明 陶加祥 郝国成
张晓峰 闻兆海 李杏梅



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

模拟电子线路是通信、电子、自动控制等专业的一门主干技术基础课程。通过对该课程的学习,学生可以系统地掌握模拟电子线路的基本原理、基本概念和各种功能单元电路的工作原理和分析设计方法,为电子系统的工程实现和后续课程学习打下必备的基础。

本书是配合学习模拟电子线路课程的辅导用书。全书分为9章,每章由“教学要求”、“知识点及重点”、“难点释疑”和“习题全解”四个部分组成。其中“难点释疑”部分是将学生学习中的常见问题和难题进行归纳并详细地解答而成,对学生学习具有较好的启发作用。作为辅导用书,本书有助于学生理解模拟电子线路的基本概念和基本分析方法,有助于开拓学生思路、提高分析问题和解决问题的能力。

本书适合普通高等学校学习模拟电子线路课程的学生使用,对准备研究生入学考试的学生也是很好的参考用书,还可作为相关教师和相关专业科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路学习指导/张友纯 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.8
ISBN 978-7-5609-6385-3

I. 模… II. 张… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教学参考资料 IV. TN 710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 127841 号

模拟电子线路学习指导

张友纯 主编

策划编辑:张毅

责任编辑:张毅

封面设计:潘群

责任校对:史燕丽

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:武汉众欣图文照排

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×960mm 1/16

印张:11.5 插页:1

字数:259千字

版次:2010年8月第1版第1次印刷

定价:21.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

模拟电子线路是联系公共基础课程与专业课程的一个重要纽带,也是学生进入工程领域的第一门课程,既有基本理论、基本分析方法等基础课程的内容,又有近似计算、器件参数等工程应用的特点,学习起来有一定难度。为了帮助学生对该课程的学习,编者将多年从事模拟电子线路教学积累的资料和经验整理成这本教学参考书,以加深对该课程基本理论、重点难点问题的理解,满足学生的学习要求。

本书与编者编写的《模拟电子线路》教材相配套,全书分为9章,每一章分为“教学要求”、“知识点及重点”、“难点释疑”和“习题全解”四个部分。“教学要求”主要针对每一章的学习内容提出相应的学习要求以供学生在学习中掌握;“知识点及重点”将每一章的内容进行梳理,归纳成知识点,力求理清各知识点之间的联系,指出各章的重要知识点,以便学生在学习中能通过掌握重点,提高学习效率;“难点释疑”是本书的精华,是编者将多年教学实践中学生经常问到的问题进行归纳并详细解答而成的,对学生加深相关概念的理解,特别是对准备考研的学生有较好的帮助;“习题全解”是将编者编写的《模拟电子线路》教材的全部习题进行了解答,希望给学习中遇到困难的学生提供一些指点和启发,但也希望读者能正确对待,处理好自主学习、独立思考和借鉴启发的关系。

本书由张友纯主编并完成全书统稿。陶加祥编写第1章和第2章,张友纯编写第3章、第4章,甘明编写第5章,李杏梅编写第6章,郝国成编写第7章,闻兆海编写第8章,张晓峰编写第9章。本书在编写过程中得到了中国地质大学(武汉)教务处和机械与电子信息学院的支持。本书的编写还参考了许多文献资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免出现错误和问题,殷切希望读者批评指正,也敬请各位专家给予指教。

编 者
2010年5月

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 教学要求	(1)
1.2 知识点及重点	(1)
1.3 难点释疑	(8)
1.4 习题全解	(10)
第 2 章 放大器基础	(20)
2.1 教学要求	(20)
2.2 知识点及重点	(20)
2.3 难点释疑	(25)
2.4 习题全解	(29)
第 3 章 放大器的频率特性	(45)
3.1 教学要求	(45)
3.2 知识点及重点	(45)
3.3 难点释疑	(51)
3.4 习题全解	(55)
第 4 章 放大电路中的负反馈	(66)
4.1 教学要求	(66)
4.2 知识点及重点	(66)
4.3 难点释疑	(70)
4.4 习题全解	(74)
第 5 章 功率放大电路	(85)
5.1 教学要求	(85)
5.2 知识点及重点	(85)

5.3	难点释疑	(90)
5.4	习题全解	(92)
第 6 章	集成运算放大器	(104)
6.1	教学要求	(104)
6.2	知识点及重点	(104)
6.3	难点释疑	(111)
6.4	习题全解	(115)
第 7 章	模拟运算电路	(124)
7.1	教学要求	(124)
7.2	知识点及重点	(124)
7.3	难点释疑	(130)
7.4	习题全解	(131)
第 8 章	模拟信号处理电路	(142)
8.1	教学要求	(142)
8.2	知识点及重点	(142)
8.3	难点释疑	(148)
8.4	习题全解	(150)
第 9 章	直流稳压电源	(163)
9.1	教学要求	(163)
9.2	知识点及重点	(163)
9.3	难点释疑	(172)
9.4	习题全解	(175)

第1章 半导体器件

1.1 教学要求

- (1) 了解半导体的基础知识。
- (2) 掌握晶体二极管、晶体三极管及场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。
- (3) 掌握二极管基本电路的分析方法与应用。
- (4) 掌握集成运算放大器的基本特点、主要参数和理想运算放大器主要特点及特性。

1.2 知识点及重点

1.2.1 半导体基础

1. 本征半导体的概念及其特性

本征半导体是指不含杂质的、纯净的半导体。本征半导体原子最外层有四个价电子，每个原子都要从四周相邻原子取得四个价电子，以组成稳定状态。热力学温度 $T = 0\text{ K}$ 和无外界其他因素激发时，价电子全部束缚在共价键内。随着温度的上升，少数价电子受热激发得到能量，当价电子获得的能量足够大时，便能挣脱原子束缚，而成为自由电子。另一方面，价电子离开共价键后，在该共价键处留下一个空位，这一空位称为空穴。自由电子和空穴成对地产生，在一定的温度下达到动态平衡。

自由电子和空穴都是载运电流的粒子，统称为载流子。温度对本征半导体的导电能力有显著的影响。

2. 杂质半导体、载流子的扩散运动和漂移运动

在本征半导体中掺入少量五价元素，其中四个价电子与锗原子结合成共价键，余下的一个价电子不在共价键之内，稍受激发就可成为自由电子，因此，每掺入一个五价元素，就相当于掺入一个自由电子。这种杂质半导体中，自由电子占多数，故称为 N 型半导体。

在本征半导体中掺入少量三价元素,这三个价电子只能与相邻的三个锗原子结合成共价键,余下的一个相邻的锗原子的共价键不完整,就有一个价电子的空位虚位以待,邻近锗原子的价电子很容易在稍受激发后过来填补这个空位,因而产生一个空穴。因此,每掺入一个三价元素,就相当于掺入一个空穴。这种杂质半导体中,空穴占多数,故称为P型半导体。

在杂质半导体中,多数载流子的数量基本上由掺杂决定,温度对它的影响很小;而少数载流子的数量基本由本征激发决定,因此温度对它的影响很大。

半导体中有两种载流子:自由电子和空穴。在一定条件下,它们都可产生两种运动,即有载流子浓度不均匀引起的扩散运动和在电场作用下的漂移运动。相应地产生两种电流,即扩散电流和漂移电流。

1.2.2 PN结与晶体二极管(重点)

1. PN结的基本原理

1) PN结的形成

在一块本征半导体的两边掺以不同的杂质,使其一边形成P型半导体,另一边形成N型半导体,则在它们的交界处就产生了电子和空穴的浓度差,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,即P区的一些空穴要向N区扩散,N区的一些电子要向P区扩散,多数载流子的扩散形成了空间电荷区,产生了内建电场。

内建电场对载流子的作用是:对多数载流子的扩散起阻碍作用,使扩散减小;另一方面使少数载流子向对方漂移。

开始时,空间电荷区较窄,内建电场较小,多数载流子的扩散大于少数载流子的漂移,随着运动的进行,空间电荷区加宽,内建电场加大,多数载流子的扩散被进一步抑制,少数载流子的漂移进一步加强,最后达到动态平衡,就形成了PN结。

2) PN结的特性

(1) PN结的单向导电性。

给PN结外加正向直流电压时,电源的正极接P区,负极接N区。在电场的作用下,P区的空穴和N区的电子都向空间电荷区挤压,从而导致PN结变窄,内建电场(势垒电势)减小,原先的平衡被打破,多数载流子的扩散大于少数载流子的漂移,形成了正向电压下正向电流。显然,正向电流随着正向电压的增大而增大。

给PN结外加反向直流电压时,电源的正极接N区,负极接P区。在电场的作用下,P区的空穴和N区的电子都拉离空间电荷区,从而导致PN结变宽,内建电场(势垒电势)增加,原先的平衡被打破,少数载流子的漂移大于多数载流子的扩散,形成了反向电压下反向电流。但是由于少数载流子浓度极低,所以,反向电流比正向电流要小得多。

反向电流有两个特点:一是在一定温度下,本征激发的少数载流子的浓度是个定值,所以反向电流基本上不随外加反向电压的变化而变化,称为反向饱和电流;二是温度的变化,将使本征激发的少数载流子浓度发生变化,所以反向电流受温度影响较大。

(2) PN 结的击穿特性。

① 雪崩击穿 雪崩击穿是由高速通过空间电荷区的电子和空穴轰击空间电荷区晶体结构中的外层电子使其脱离原子的束缚成为载流子,而被撞出来的载流子又去轰击其他的外层电子,造成了载流子数目突然急剧增加,犹如雪崩那样的击穿。

雪崩击穿所需要的反向电压较大,一般在 6 V 以上。

② 齐纳击穿(隧道击穿) 齐纳击穿是空间电荷区的电场直接把空间电荷区共价键中的电子拉出来,产生电子-空穴对,使得载流子数目突然增多的击穿。齐纳击穿一般发生在 6 V 以下。

击穿并不意味着 PN 结的损坏,只要电流的增长受到限制,就不至于造成 PN 结内部发热使之烧毁。这时,当外加电压拆除后,器件的特性可以恢复。

(3) PN 结的电容效应。

① 势垒电容 C_T 它是由耗尽层内电荷储存作用引起的。它的电容量随外加电压的改变而改变,并不成线性关系。

② 扩散电容 C_D 它是由载流子扩散引起的。

一般来说,PN 结在正向运用时,势垒电容和扩散电容并存,扩散电容要大些,起主要作用;反向运用时,只有势垒电容。

(4) PN 结的温度特性。

半导体中的本征激发载流子数目随温度的变化急剧变化,使得 PN 结的特性对温度十分敏感。温度对 PN 结的特性影响有两个。

① 反向饱和电流随温度升高而增大。温度每升高 1 °C,反向饱和电流增加约 7%。即温度每升高 10 °C,反向饱和电流约增加一倍。

② 势垒电势随温度升高而下降。温度每升高 1 °C,势垒电势降低约 2 mV。这表现为当外加正向电压不变时,PN 结的正向电流将随温度的升高而增大。

2. 晶体二极管

二极管是一个 PN 结,故二极管具有上述 PN 结的特性。

1) 晶体二极管的特性曲线

在正向电压的作用下,开始电流很小。而当正向电压超过某一直值时电流会很快增大。这一电压称为开启电压 U_T ,对于锗管,该值为 0.2 V,对于硅管,该值约为 0.6 V。

在反向电压的作用下,当反向电压不大时,反向电流为很小的反向饱和电流,且随反向电压的增大而稍有增加,但变化不大。当反向电压超过某一直值时,反向电压将急剧增加。

2) 晶体二极管特性的解析式

(1) 伏安特性。

$$I = I_S(e^{\frac{q}{kT}U} - 1) \quad (1-1)$$

当正向电压超过 100 mV 时,有

$$I = I_S e^{U/U_T} \quad (1-2)$$

当反向电压超过 100 mV 时,有

$$I = -I_s \quad (1-3)$$

(2) 等效电阻。

二极管是一个非线性电阻,其等效电阻有直流电阻和微变电阻(交流电阻)之分。直流电阻就是二极管端电压与流过的电流之比;微变电阻就是在工作点上微小的电压变化引起微小的电流变化的二者变化量比值。

微变电阻为

$$r_d = 26/I_Q \quad (1-4)$$

有两点应该注意:一是二极管是一个非线性元件,它的直流和微变等效电阻不是一个常数,都与其工作点有关;二是在同一工作点上,直流电阻和微变电阻是不同的。

3) 二极管的参数

器件的参数是说明器件特性的数据,它是根据使用要求提出来的,也是在使用中选择器件的依据。由于二极管的参数在教材中已解释得很清楚,此处不做赘述。后面其他器件的参数也做同样处理。

1.2.3 特殊二极管

1. 稳压管

稳压管也是一种二极管,它是利用 PN 结的反向击穿特性进行工作的,只是它的反向特性曲线比一般的二极管要更陡一些。稳压管在稳压设备和一些电子电路中得到广泛的应用。

稳压管工作时的电流范围应在 $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ 之间。当工作电流小于 I_{Zmin} 时,稳压效果将受影响;当工作电流大于 I_{Zmax} 时,稳压管将因过热而损坏。

稳压管的稳定电压受温度变化影响。不同型号的稳压管有不同的温度系数 α_z ,且有正负之分。一般来说,稳压值低于 4 V 的稳压管, α_z 为负值,稳压值高于 6 V 的稳压管, α_z 为正值,介于 4~6 V 之间的可能是正的,也可能是负的。因此可以将正、负温度系数的稳压管合理搭配使用,以提高稳压效果。

2. 光电二极管

PN 结在反向电压下,当有光照时,半导体共价键中的价电子获得能量,产生的电子-空穴对增多,导电能力加强,反向电流增大。并且,在一定的反向电压范围内反向电流与光照度成正比。具有这一特性的二极管就是光电二极管。

光电二极管可以用做光的检测。当 PN 结的面积较大时,可以做成光电池。

3. 发光二极管

发光二极管简称 LED,其内部的基本单元仍然是一个 PN 结。当外加正向电压时,多数载流子扩散到对方复合,在电子与空穴复合的过程中,有一部分能量以光的形式发出,二极管便发光。

发光二极管主要用做显示器件。除单独使用外,还可以做成数码管或阵列显示器。

将发光二极管和光电二极管组合起来可以构成二极管型光电耦合器,主要用于一些常见的数字控制系统中。

4. 变容二极管

利用PN结的势垒电容随外加反向电压的变化而变化的特性就可制成变容二极管,变容二极管的电容容量很小,为皮法(10^{-12} F)数量级,它有一定的电容变化范围,主要用于高频场合,如电调谐、调频信号的产生等。

1.2.4 晶体三极管(重点)

1. 三极管的工作原理

1) 载流子的传输过程

三极管有两个PN结,即发射结和集电结。这两个PN结将晶体分为三个区,即发射区、基区和集电区,这三个区各分别引出一极,即发射极、基极和集电极。三极管在结构上对称,但发射区的载流子浓度比集电区载流子浓度要高得多,所以一般情况下发射极和集电极不能互换。

NPN 三极管的放大原理如图 1-1 所示,发射结正偏,集电结反偏。发射结正偏变薄,有利于发射区自由电子扩散;集电结反偏变宽,有利于基区的自由电子产生漂移。

由图 1-1 可知三极管三个极的电流分别为:

(1) 发射极电流由发射区多数载流子 - 自由电子向基区扩散形成的 I_{EN} 和由基区多数载流子 - 空穴向发射区扩散形成的 I_{EP} 两部分构成;

(2) 基极电流由三部分构成,即由基区多数载流子 - 空穴向发射区扩散形成的 I_{EP} 、基区和集电区少数载流子向对方漂移形成的反向饱和电流 I_{CBO} ,以及基区多数载流子 - 空穴和发射区扩散到基区的多数载流子 - 自由电子复合形成的电流 I_{BN} 构成;

(3) 集电极电流由从发射区扩散到集电结边的多数载流子 - 自由电子形成的 I_{CN} 和反向饱和电流 I_{CBO} 构成。

2) 电流分配关系

由于发射区发射的电子可由发射结电压控制,所以三极管电流分配关系就是指 I_{EN} 、 I_{CN} 和 I_{BN} 间的关系。由于 I_{EP} 相对于 I_{EN} 可以忽略不计,所以一般有 $I_E = I_{EN}$ 。

(1) 共基极的电流分配关系为

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \quad (1-5)$$

或

$$I_C = \bar{\alpha} I_E - I_{CBO} \quad (1-6)$$

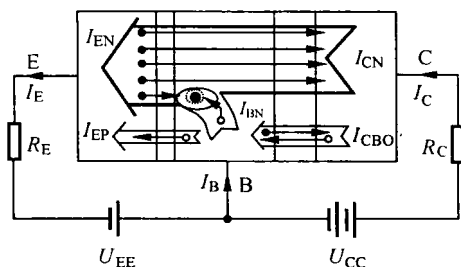


图 1-1 载流子的传输过程及电流分配原理

(2) 共射接法的电流分配关系为

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} = \beta I_B + I_{CEO} \quad (1-7)$$

共基极电流分配关系描述的是集电极电流对发射极电流的放大关系,共射极的电流分配关系描述的是集电极电流对基极电流的放大关系。在这两个关系中都出现了 I_{CBO} ,由图 1-1 可知, I_{CBO} 是集电结反向饱和电流,它不受发射结电压控制,且受温度影响较大,所以是有害的。

2. 三极管的伏安特性曲线

1) 共射接法的输入特性曲线

共射接法的输入特性曲线是指以集电极与发射极之间输出电压 u_{CE} 为参变量,输入电流 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的关系曲线。和普通二极管的特性曲线相似,随着 u_{CE} 增加,曲线将向右移,但 u_{CE} 大到一定值后,曲线基本重合。

2) 共射接法的输出特性曲线

共射接法的输出特性曲线是指以输入电流 i_B 为参变量,输出集电极电流 i_C 和集电极与发射极之间电压 u_{CE} 的关系。不同的 i_B 对应一条不同的曲线。输出特性有以下特点。

(1) 输出特性曲线分为三个区域,即截止区、放大区和饱和区。相应地,三极管有三种基本工作状态,即截止状态、放大状态和饱和状态,另加一个反向放大状态。它们对 PN 结偏置要求如表 1-1 所示。

表 1-1 三极管的四种运用状态

集电结 运用状态 发射结	正向运用	反向运用
	饱和状态	放大状态
正向运用	反向放大状态	截止状态

(2) 对于小功率硅管,饱和电压 U_{CES} 约为 0.5 V,小功率锗管的 U_{CES} 约为 0.3 V,而大功率管的 U_{CES} 为 1 ~ 3V。

(3) 交流电流放大系数和直流电流放大系数近似相等,即 $\beta \approx \bar{\beta}$ 。

3. 三极管的温度特性

三极管参数与温度密切相关,了解参数随温度变化而变化的规律对于电路设计是很重要的。

(1) 温度对 I_{CBO} 的影响 温度升高, I_{CBO} 增加,温度每升高 10 °C, I_{CBO} 约增加一倍。

(2) 温度对 U_{BE} 的影响 当温度升高时,对于正偏发射结,若保持正向电流 I_E 不变,则正偏电压 U_{BE} 要减小,无论是硅管还是锗管,温度每升高 1 °C, U_{BE} 要减小 2 ~ 2.5 mV。

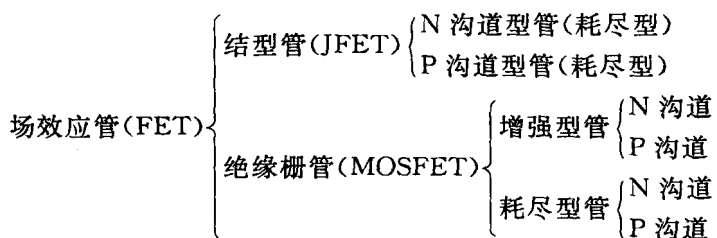
(3) 温度对 β 的影响 温升会使三极管的 β 增大,工程上以温度每升高 1 °C, β 值增加自身的 0.5% ~ 1% 来计算。

1.2.5 场效应管

场效应管(FET)是用电场来控制输出电流的半导体器件。

1. 场效应管的分类及工作原理

1) 场效应管的分类



2) 场效应管的工作原理

结型场效应管利用改变栅源电压,来改变反向 PN 结空间电荷区的宽度,进而控制沟道的导电能力,从而控制漏极电流的大小。绝缘栅场效应管利用改变栅源电压,来改变导电沟道电荷的数量,进而改变沟道的导电能力,从而控制漏极电流的大小。

耗尽型场效应管在没有外加栅源电压时,就已经存在导电沟道;而增强型场效应管只有在在外加栅源电压超过一定值时,才会出现导电沟道。

2. 场效应管的伏安特性曲线

1) 输出特性曲线

场效应管输出特性曲线是指在栅源电压 u_{GS} 一定的情况下,漏极电流 i_D 与漏源电压 u_{DS} 之间的关系曲线。从输出特性曲线上可明显地看出,场效应管是电压控制型器件,由栅源电压 u_{GS} 控制其漏极电流 i_D 。

2) 转移特性曲线

场效应管是电压控制型器件,由于栅极输入端基本上没有电流,所以不讨论它的输入特性,而研究它的转移特性。所谓转移特性是指在一定漏源电压 u_{DS} 下,栅源电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制特性。

从各类型场效应管的输出特性和转移特性曲线来看,它们有以下特点。

(1) 场效应管可分为放大区、可变电阻区和截止区。放大区是漏源电压增加到使导电沟道出现预夹断后的工作区间;可变电阻区是漏源电压小于使导电沟道出现预夹断前的工作区间(使导电沟道产生预夹断的漏源电压 u_{DS} 与栅源电压 u_{GS} 有关,它们的分界线是 $u_{DS} = u_{GS} - V_P$);截止区是栅源电压 u_{GS} 使导电沟道完全夹断后的区间(对于耗尽型(结型), $|u_{GS}| \geq |V_P|$;对于增强型, $|u_{GS}| \leq |V_{th}|$)。

(2) 转移特性曲线可以从输出特性曲线获得。

(3) 耗尽型场效应管在放大区工作时栅源电压可正可负,因而与增强型和结型场效应管相比,栅源偏置具有灵活性。

(4) 结型场效应管在放大区工作时栅源电压不能大于零(N 沟道)。

3. 跨导 g_m 和输出电阻 r_{ds}

跨导 g_m 是在 u_{DS} 为常数时,漏极电流的微变量与栅源电压的微变量的比值,即

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{u_{DS}=\text{常数}} \quad (1-8)$$

跨导的大小反映栅源电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 控制能力的强弱。

输出电阻 r_{ds} 是在恒流区(放大区) u_{GS} 为常数时, u_{DS} 的增量与 i_D 的增量之比,即

$$r_{ds} = \left. \frac{du_{DS}}{di_D} \right|_{u_{GS}=\text{常数}} \quad (1-9)$$

1.2.6 运算放大器

1. 集成运算放大器的输入方式

集成运放有两个输入端,即反相输入端和同相输入端。它有两种基本输入方式,即差模输入方式和共模输入方式。当输入为任意信号时,可以将它们分解为一对差模信号和一对共模信号,即

$$u_{id} = u_+ - u_- \quad (1-10)$$

$$u_{ic} = \frac{u_+ + u_-}{2} \quad (1-11)$$

2. 理想运算放大器及其特性

将运算放大器各参数理想化后的运算放大器为理想运算放大器,它的特性如下。

1) 输入特性

$$i_+ = i_- = 0 \quad (1-12)$$

2) 传输特性

$$-U_{sat} < u_o < U_{sat}, \quad u_{id} = 0 \quad (1-13a)$$

$$u_o = U_{sat} \frac{|u_{id}|}{u_{id}}, \quad u_{id} \neq 0 \quad (1-13b)$$

由传输特性可知,运算放大器线性工作时必有: $u_{id} = 0$; 当 $u_{id} \neq 0$ 时,运算放大器一定工作在非线性状态。

1.3 难点释疑

1. 温度对反向饱和电流的影响比正向电流的影响要大得多

反向饱和电流是由少数载流子在反向电压的作用下漂移运动产生的。而少数载流子是由本征激发产生的,本征激发直接与温度相关,所以,温度每升高 10°C ,反向饱和电流就大约增加一倍。而正向电流是多数载流子扩散运动产生的,多数载流子的浓度基本上是由掺杂决定的,本征激发的少数载流子对它的影响很小,所以,温度对正向电流的影响就比反向饱

和电流小得多。

2. 齐纳击穿电压比雪崩击穿电压低

齐纳击穿是由于空间电荷区内的强电场把半导体原子共价键的束缚电子强行拉出使新的电子-空穴对大量涌现而发生的击穿。这一般发生在掺杂浓度高的二极管中。由于掺杂浓度高,结区很窄,不太高的反向电压就能使空间电荷区的电场强度变得很大,从而引起齐纳击穿。这种击穿电压一般为 $U_z < 6\text{ V}$ 。

雪崩击穿则是由于参与漂移的少数载流子在空间电荷区高速运动撞击其他粒子时,大量产生新的电子-空穴对而最后导致的击穿。这一般发生在掺杂浓度低的二极管中。由于掺杂低,结区较宽,少数载流子在运动时能获得较大的动能,导致雪崩击穿。由于结区较宽,产生雪崩击穿需要较高的外加电压,而这时漂移的少数载流子可以获得较大的能量而使雪崩击穿发生。雪崩击穿电压一般为 $U_z > 6\text{ V}$ 。在 6 V 附近两种击穿都有可能。

3. 三极管中 I_{CBO} 是有害的,应尽量减小

三极管电流放大作用利用了电流分配原理,即在发射结电压作用下从发射区发射的电流 I_{EN} 在基区分配为基区复合电流 I_{BN} 和集电区收集电流 I_{CN} ,而在三极管的三个极输出的电流为(忽略了 I_{EP})

$$\begin{aligned} I_{\text{E}} &\approx I_{\text{EN}} \\ I_{\text{C}} &= I_{\text{CN}} + I_{\text{CBO}} \\ I_{\text{B}} &\approx I_{\text{BN}} - I_{\text{CBO}} \end{aligned}$$

I_{CBO} 没有参与电流分配,对电流放大没有贡献, I_{C} 和 I_{B} 中又不能除去 I_{CBO} ,所以它是有害的。

另一方面, I_{CBO} 是集电结反偏时有少数载流子漂移产生的,受温度影响较大,是影响三极管温度特性的主要因素之一。

4. 三极管输出特性曲线在放大区有一定倾斜

这是由基区调宽效应引起的。当集电极与发射极电压 U_{CE} 增加时,由于集电结反偏,所加电压基本上全加到集电结上,集电结空间电荷区变宽,相应地基区将变窄。基区变窄将使这些电子在基区运动时间减小,与基区空穴复合减少,要保持 I_{B} 不变(输出特性曲线上 I_{B} 为常数),将使发射区发射电子增加,即 I_{E} 增加, I_{B} 不变,所以 I_{C} 增加,输出曲线便产生了倾斜。

5. 场效应管中导电沟道发生于夹断后还有电流

当场效应管漏源电压 U_{DS} 增加到使漏栅电压 $U_{\text{DG}} = |V_{\text{P}}|$,即 $u_{\text{DS}} = u_{\text{GS}} - V_{\text{P}}$ 时,场效应管导电沟道产生预夹断,即导电沟道在靠近漏极处被正离子(以 N 沟道为例,这时沟道内这部分自由电子被正电场拉走)组成的空间电荷区隔断。空间电荷区没有载流子,但是,夹断区为电场正极性端,可以使沟道内靠近夹断区边缘的电子产生漂移而形成电流。

这时,如果 U_{DS} 再增加,则由于空间电荷区电阻比沟道电阻要大得多,增加部分几乎全加在夹断区,沟道电压增加很少,所以输出电流 I_{D} 也增加很少。

1.4 习题全解

1-1 试说明 PN 结形成的工作原理。

解 在一块本征半导体的两边掺以不同的杂质,使其中一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,则在它们的交界处就产生了电子和空穴的浓度差,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。载流子的扩散运动,破坏了 P 区和 N 区交接面原有的电中性, P 区一边失去空穴而留下负离子,而 N 区一边失去电子,留下正离子。这些不能运动的正、负离子集中在 P 区和 N 区交界的两边,形成了势垒区,并产生了内建电场,而内建电场建立后,电场力一方面阻止多数载流子向对方扩散,另一方面又使少数载流子产生漂移运动,扩散和漂移这两种运动方向相反,由于多数载流子扩散到对方就成为少数载流子,所以漂移运动相当于将扩散到对方的一部分多数载流子拉回到原区间。开始时,空间电荷区不大,内建电场小,多数载流子的扩散大于少数载流子的漂移,随着这种情形的继续,空间电荷区增大,内建电场加强,进一步阻止多数载流子的扩散和加大少数载流子的漂移,最后使得多数载流子的扩散和少数载流子的漂移相等,达到动态平衡。

1-2 若 PN 结在室温 27°C 时,其反向电流为 $1\mu\text{A}$,试估计在 0°C 和 60°C 时的反向电流。

解 由于温度每升高 10°C ,反向饱和电流约增加一倍。所以在 0°C 时反向电流约为 $0.25\mu\text{A}$;在 60°C 时反向电流约为 $8\mu\text{A}$ 。

1-3 一个变容二极管,当反偏电压 $U_R = -10\text{V}$ 时,其电容值为 60pF ,若内建电位差 $U_{\phi} = 0.73\text{V}$, $\gamma = 1/2$,求电容量为 120pF 时的反向电压值。

解

$$C_T = \frac{K}{(U_{\phi} - U)^{\gamma}}$$

U_{ϕ} 为 PN 结的势垒电压, $U_{\phi} = 0.73\text{V}$; U 为 PN 结的反向电压, $U = -10\text{V}$; $\gamma = 1/2$,则有

$$60 \times 10^{-12} = \frac{K}{(0.73 + 10)^{\frac{1}{2}}}$$

$$K = 60 \times 10^{-12} \times (10.73)^{\frac{1}{2}}$$

当 $C_T = 120\text{pF}$ 时,有

$$120 \times 10^{-12} = \frac{60 \times 10^{-12} \times \sqrt{10.73}}{(0.73 - U)^{\frac{1}{2}}}$$

$$(0.73 - U)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \sqrt{10.73}$$

$$0.73 - U = \frac{1}{4} \times 10.73$$

$$U = \left(0.73 - \frac{10.73}{4}\right) \text{V} = -1.95\text{V}$$

即反向电压值为 1.95V 。

1-4 已知二极管的 $I_S = 0.1\text{nA}$,室温下 $U_T = 26\text{mV}$,试求出二极管两端电压 U_D 为

0.6 V 时的直流电阻 R_D 和交流电阻 r_d 。

解 当 $U_D = 0.6$ V 时,有

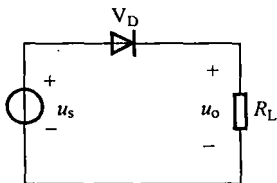
$$I_D = I_S(e^{U_D/U_T} - 1) = 1 \times 10^{-10} \times e^{0.6/0.026} = 1 \text{ A}$$

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0.6}{1} \Omega = 0.6 \Omega$$

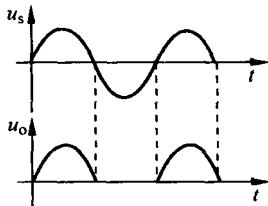
$$\frac{1}{r_d} = \frac{I_D}{U_T} = \frac{1}{0.026}$$

$$r_d = \frac{0.026}{1} \Omega = 0.026 \Omega$$

1-5 二极管电路如题 1-5 图所示,设二极管正向电阻为零,反向电阻为无穷大,当外加电压为 $u_s = 40\sin 314t$ V 时,试画出输出电压 u_o 波形;若输出电阻 $R_L = 100 \Omega$,试求出负载电流的平均值。



题 1-5 图



题 1-5 解图

解 (1) 当 $u_s = 40\sin 314t > 0$ 时, V_D 导通, $u_o = u_s$;

当 $u_s = 40\sin 314t < 0$ 时, V_D 截止, $u_o = 0$ 。

输出电压 u_o 的波形如题 1-5 解图所示。

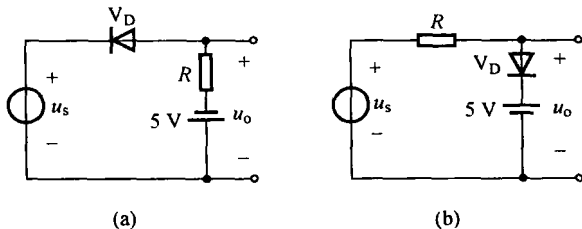
(2) 若 $R_L = 100 \Omega$, 则

$$i = \frac{U_s}{R_L} = \frac{40\sin 314t}{100} = 0.4\sin 314t$$

所以

$$i_{av} = \frac{2}{\pi} i_m = \frac{0.8}{\pi}$$

1-6 在题 1-6 图所示的限幅电路中,若输入信号为 $u_s = 10\sin 314t$,二极管为理想器件(导通电阻为零),试画出输出电压 u_o 的波形。



题 1-6 图