



学 士 版

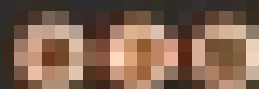
● 本章综述 ● 释疑解难 ● 典型例题 ● 考研指点

模拟电子技术基础

学考指要

赵世强 主编

西北工业大学出版社



第 1 版 (2018 年 12 月) 第 2 版 (2020 年 12 月) 第 3 版 (2022 年 12 月) 第 4 版 (2024 年 12 月)

模拟电子技术基础

第 4 版

第 4 版

第 4 版

第 4 版

模拟电子技术基础 学考指要

主 编	赵世强	
副主编	赵 满	闫玉国
编 者	赵世强	赵 满
	闫玉国	周义健

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据模拟电子技术基础(低频部分)的课程教学大纲及硕士研究生入学考试的基本要求,在作者多年教学实践的基础上完成的。

根据目前模拟电子技术基础主流教材所包括的常用半导体器件,基本放大器,多级放大器,集成运算放大电路,放大电路的频率响应,放大电路中的反馈,信号处理电路,波形的发生和信号的转换,功率放大电路,直流电源教学内容,本书对上述内容每一章节进行综述,指出要求掌握的重点内容;对基本概念释疑解难,对要求掌握的基本电路及基本计算方法进行典型例题分析解答,例举考研题目进行解答。

本书可作为高等院校电类专业本科生、专科生及自学人员学习模拟电子技术基础课程的辅导教材,也可供进一步深造的考研者使用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础学考指要/赵世强主编. —西安:西北工业大学出版社,2006.11

ISBN 7-5612-2166-5

I. 模… II. 赵… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 133320 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司印制

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:17.5

字 数:479 千字

版 次:2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

定 价:24.00 元

前 言

模拟电子技术基础是电气、自动控制、信息、通信等专业的必修课,也是相关专业研究生入学考试科目之一。该课程的特点是器件的工作状态复杂,电路种类繁多,分析方法灵活,工程性强,使许多学习者感到难学、难懂、难掌握,因此学习这门课程时应多做练习和实验。本书正是为了帮助大学生学习该课程和准备参加研究生入学考试而编写的,是广大学生及自学者的好帮手。

从模拟电子技术基础课程要求学生掌握基本概念、器件基本工作原理、基本电路工作原理和计算分析方法,为将来工作中应用电子技术解决实际问题打下牢固的基础这一原则考虑出发,结合目前主流教材的教学内容,本书共分10章。每章包括以下四个方面的内容。

(1)本章综述:对本章内容进行概述、归纳、总结,指出要求掌握的重点内容,利于读者正确掌握基本概念、工作原理和分析方法。

(2)释疑解难:针对本章重点、难点及易混淆的概念及实际工程实践中遇到的问题,以问答的方式进行解答;对计算过程中易发生的错误进行释疑。

(3)典型例题:对本章所要求掌握的基本工作电路、基本分析方法和计算方法,进行典型例题分析、计算,题型具有多样化,解题步骤详细。

(4)考研指点:对考研所可能涉及的本章中的基本概念,以填空和选择题形式进行解答,并对典型计算题进行详解。

本书由赵世强主编,并由赵满、闫玉国任副主编。赵满编写了第1~3章,赵世强编写了第4~6章,闫玉国编写了第7~8章,周义健编写了第9~10章。全书由赵世强统稿。

对本书选用的参考文献的作者,表示真诚的感谢。

由于编者水平有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2006年5月

目 录

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 本章综述	1
1.2 释疑解难	1
1.3 典型例题	7
1.4 考研指点	15
1.5 综合练习	22
第 2 章 基本放大器	25
2.1 本章综述	25
2.2 释疑解难	25
2.3 典型例题	27
2.4 考研指点	44
第 3 章 多级放大器	55
3.1 本章综述	55
3.2 释疑解难	55
3.3 典型例题	57
3.4 考研指点	68
第 4 章 集成运算放大电路	78
4.1 本章综述	78
4.2 释疑解难	78
4.3 典型例题	79
4.4 考研指点	86
第 5 章 放大电路的频率响应	90
5.1 本章综述	90
5.2 释疑解难	90
5.3 典型例题	93

5.4 考研指点	108
第6章 放大电路中的反馈	115
6.1 本章综述	115
6.2 释疑解难	115
6.3 典型例题	119
6.4 考研指点	142
第7章 信号处理电路	157
7.1 本章综述	157
7.2 释疑解难	157
7.3 典型例题	161
7.4 考研指点	180
第8章 波形的发生和信号的转换	189
8.1 本章综述	189
8.2 释疑解难	189
8.3 典型例题	191
8.4 考研指点	217
第9章 功率放大电路	231
9.1 本章综述	231
9.2 释疑解难	231
9.3 典型例题	234
9.4 考研指点	246
第10章 直流电源	252
10.1 本章综述	252
10.2 释疑解难	252
10.3 典型例题	255
10.4 考研指点	267
参考文献	274

第1章

常用半导体器件

1.1



本章介绍了半导体的基础知识;重点阐述了半导体二极管、稳压二极管、晶体管(BJT)和场效应管(FET)的工作原理、特性曲线和主要参数;简单介绍了光电三极管、单结晶体管、晶闸管的工作原理和集成电路中的元件及特点。

本章重点掌握半导体二极管、稳压二极管的伏安特性及主要参数;晶体管(BJT)和场效应管(FET)的输入、输出特性曲线和主要参数。熟悉理解下列定义、概念及原理:自由电子与空穴,扩散与漂移,复合,空间电荷区,PN结,耗尽层,导电沟道,二极管的单向导电性,稳压管的稳压作用,晶体管(BJT)和场效应管(FET)的放大作用及三个工作区域。了解选用器件的原则。

1.2



1.2.1 为什么采用半导体材料制作电子器件?

答 在半导体中,人为地掺入特定的杂质元素,半导体的导电性能具有可控性;并且在光照和热辐射条件下,其导电性还有明显的变化。这些特殊的性能就决定了半导体可以制作各种电子器件。

1.2.2 何谓本征半导体?本征半导体导电吗?

答 将纯净的半导体经过一定的工艺过程制成单晶体,即为本征半导体。在室温(27°C)条件下,本征半导体的导电性能很差,且与环境温度密切相关。半导体材料导电性能对温度的这种敏感性,可以用来制作热敏和光敏器件,又是造成半导体器件温度稳定性差的原因。

1.2.3 为什么说空穴是可移动的载流子?它与自由电子的移动有何不同?

答 晶体中的共价键具有很强的结合力,因此,在常温下,仅有极少数的价电子由于热运动(热激发)获得足够的能量,从而摆脱共价键的束缚变成成为自由电子。与此同时,在共价键中留下一个空位置,称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电,或者说空穴带正电。在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现的。若在本征半导体两端外加一电场,则一方面自由电子将产生定向移动,形成电子电流;另一方面由于空穴的存在,价电子将按一定的方向依次填补空穴,也就是说空穴也产生定向移动,形成空穴电流,从这个意义上讲空穴是可移动的载流子。它与自由电子的移动不同之处是必须依赖价电子对空穴的填补运动。

1.2.4 PN结的内建电势是怎样形成的?它的作用是什么?

答 N型半导体与P型半导体相互接触后,在N区和P区交界面处,由于电子和空穴的浓度差很大,电子向P区扩散,空穴向N区扩散,由于电子和空穴都是带电的,它们扩散的结果使N区和P区中原来保持的电

中性被破坏了,在交界面处P区侧,因失去空穴,留下了带负电的不能移动的杂质离子。在交界面处N区侧,因失去电子,留下了带正电的不能移动的杂质离子。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷,它们集中在交界面附近,形成了所谓的PN结,在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区又称耗尽区,它的电阻率很高,又称高阻区。由于正负电荷之间的相互作用,在空间电荷区中就形成了一个电场,其方向从N区指向P区。这个电场不是外加电压形成的,故称为内建电场,又称为内建电势。

内建电势有助于N区和P区的少子向对方漂移,而对N区和P区多子的扩散产生阻碍作用。

1.2.5 空间电荷区是否占据P,N半导体的全部呢?

答 空间电荷区仅存在N区和P区交界面处,很薄,约几微米至几十微米,不占据P,N半导体的全部,空间电荷区外侧的部分仍为P,N半导体,处于电中性。

1.2.6 PN结为什么具有单向导电性?PN结上所加端电压与电流符合欧姆定律吗?

答 PN结正偏时,外加电场与内建电场方向相反,多子扩散作用超过少子漂移,多子形成的扩散电流较大,并随偏压呈指数增加。PN结反偏时,外加电场与内建电场方向相同,存在净的少子的漂移电流,数值很小。PN结正偏时,流过PN结的正向电流很大,PN结反偏时,流过PN结的反向电流很小,这种特性称为PN结的单向导电性。流过PN结的电流与PN结两端的电压呈非线性,因此PN结上所加端电压与电流不符合欧姆定律。PN结上所加端电压 u_D 与电流 i_D 为指数关系:

$$i_D = I_S(e^{\frac{u_D}{V_T}} - 1)$$

式中, I_S 为PN结的反向饱和电流。

1.2.7 如何理解PN结的势垒电容 C_t 与扩散电容 C_d ?

答 势垒电容 C_t :当PN结外加电压变化时,空间电荷区的宽度将随之变化,空间电荷区的电荷数量随外加电压而增多或减少,此现象如同电容器的充、放电过程,空间电荷区的宽度变化所等效的电容称为势垒电容 C_t 。 C_t 具有非线性,它与结面积、空间电荷区的宽度、半导体的介电常数及外加电压有关。对一个制作完毕的PN结, C_t 与外加电压 u 的关系如图1.2.1所示。当PN结加反向电压时, C_t 明显随 u 的变化而变化,利用这一特性制成各种变容二极管。考虑到功耗,变容二极管通常工作在反向偏压状态。

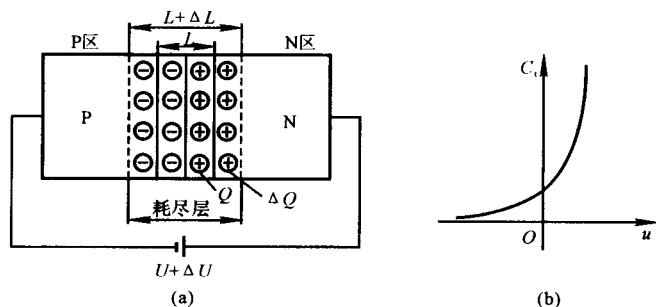


图 1.2.1

扩散电容 C_d :PN结处于平衡状态时的少子常称为平衡少子。PN结处于正向偏压时,从P区扩散到N区的空穴和从N区扩散到P区的自由电子均称为非平衡少子。当正向偏压一定时,靠近耗尽层交界面的地方非平衡少子的浓度高,而远离交界面的地方浓度低,且浓度自高到低逐渐衰减,直到零,形成一定的浓度梯度(浓度差),从而形成扩散电流。当外加正向偏压增大时,非平衡少子的浓度增大且浓度梯度也增大,从外部看正向

电流(扩散电流)增大。当外加正向偏压减少时,与上述变化相反。扩散区内,电荷的积累和释放过程与电容器的充、放电过程相同,这种电容效应称为扩散电容 C_d 。与势垒电容 C_t 一样, C_d 也具有非线性,它与流过 PN 结的正向电流 i_D , 温度的电压当量 V_T 以及非平衡少子的寿命 τ 有关。 i_D 越大、 τ 越大、 V_T 越小, C_d 就越大,即 $C_d = \frac{\tau i_D}{V_T}$ 。

PN 结的结电容 C_j 是 C_t 与 C_d 之和,即 $C_j = C_t + C_d$ 。

1.2.8 PN 结的直流电阻 R_D 与交流电阻 r_d 有何区别?

答 PN 结的直流电阻 R_D 的定义是施加于 PN 结的正向直流偏压 U_D 与正向电流 I_D 的比值,即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \approx \frac{U_{D(on)}}{I_D}$$

式中, $U_{D(on)}$ 为 PN 结的导通电压。

交流电阻 r_d 的定义是当正向直流偏压 U_D 变化 ΔU_D 时,导致正向电流 I_D 变化 ΔI_D ,即

$$r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D}$$

当 $T = 27^\circ\text{C}$ 时,由 $i_D = I_S(e^{\frac{qU_D}{kT}} - 1)$ 导出

$$r_d \approx \frac{26}{I_D}$$

交流电阻 r_d 的倒数则表示在静态工作点附近正向直流偏压 U_D 控制正向电流 I_D 变化的能力。

直流电阻 R_D , 交流电阻 r_d 与静态工作点有关。在相同的正向电流 I_D 条件下,导通电压 $U_{D(on)}$ 随电流变化不大,可近似视为 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$ 之间的常数, $V_T = 26 \text{ mV}$ ($T = 27^\circ\text{C}$),因此在常温下,无论 I_D 如何变化,交流电阻 r_d 总是远小于直流电阻 R_D ,两者相差近 $650/26 \approx 25$ 倍。若进一步提高 I_D ,可进一步降低 r_d ,这决定了 PN 结的一个重要应用:直流电平移位,通过 PN 结可产生一个固定的直流导通压降,而交流信号通过 PN 结时,因交流电阻 r_d 很小,故基本没有损耗。

1.2.9 温度变化时,PN 结的导通结压降为什么会发生变化?

答 因 PN 结形成时,多子形成的扩散电流等于少子形成的漂移电流,温度变化使 P 型和 N 型半导体中的少子数目发生变化导致漂移电流发生变化,故扩散电流及内建电势将随温度发生变化,内建电势的变化必然导致 PN 结的导通结压降发生变化。温度每上升 1°C , PN 结的导通结压降下降约 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$ 。

1.2.10 PN 结的雪崩击穿、齐纳击穿、热击穿有何区别?

答 导致 PN 结(或二极管及稳压管)雪崩击穿的原因:当反向电压增大时,空间电荷区内部的电场增强,少数载流子在电场作用下的漂移速度加快,动能增大。当反压增大到一定数值时,少子的动能相当大。当它与中性原子碰撞时,可以把中性原子的价电子碰撞出来,产生自由电子-空穴对。这个过程称为碰撞电离。新产生的自由电子和空穴在强电场作用下漂移速度也加快,再去撞击其他的中性原子,也使它们电离,结果又产生新的自由电子-空穴对。如此连锁反应使得空间电荷区中载流子的数量急剧增多,因此流过 PN 结的反向电流也急剧增大。因增大的速度极快,像雪崩一样,故把这种击穿称为雪崩击穿。

导致齐纳击穿的原因:当 PN 结的掺杂浓度很高时,空间电荷区就十分薄,对这种特别薄的 PN 结,只要加上不大的反向电压,空间电荷区的电场强度就达到非常高的数值,这种很强的电场强度可以把空间电荷区内中性原子的价电子直接从共价键中拉出来,产生电子-空穴对,这个过程称为场致激发,强电场使空间电荷区内许多中性原子都发生场致激发,从而产生大量的载流子,使 PN 结的反向电流剧增,呈现反向击穿现象。这种击穿称为齐纳击穿。

击穿电压 6 V 以下属于齐纳击穿, 击穿电压在 6 ~ 40 V 之间, 雪崩击穿和齐纳击穿同时发生, 而击穿电压大于 40 V 就属于雪崩击穿。两种击穿的硅 PN 结都可以制成硅稳压管。

导致热击穿的原因: 由于 PN 结的功耗是电压和电流的乘积。当反向电压比较高时, 功耗就比较大, 这将引起 PN 结温度升高; 温升又引起本征激发产生的少子增多, 促使反向电流增大; 反向电流增大, 又引起功耗增大, 使结温继续上升。在散热不良的情况下, 这种连锁反应会引起反向电流剧增, 导致 PN 结击穿。发生击穿是由于 PN 结过热, 故称为热击穿。热击穿往往使 PN 结烧坏, 不能再恢复工作。

1. 2. 11 使用二极管时, 主要考虑哪几个参数?

答 主要考虑如下参数:

最大整流电流 I_F : 指二极管工作时, 允许通过的最大正向平均电流。在规定的散热条件下, 正向平均电流若超过此值, 则将因结温过高而烧坏。

最高反向工作电压 U_R : 指二极管工作时, 允许外加的最大反向电压, 超过此值, 二极管有可能因反向击穿而损坏。通常手册中 U_R 为二极管实际击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半。

反向电流 I_R : 指二极管未击穿时的反向电流 I_R 值愈小, 二极管的单向导电性愈好, I_R 对温度非常敏感。

最高工作频率 f_m : 是二极管工作的上限频率。超过此值时, 由于结电容的作用, 二极管将不能很好地体现单向导电性。

1. 2. 12 PN 结和二极管的伏安特性有何区别?

答 相同点是都具有单向导电性。

区别是由于二极管存在半导体体电阻和引线电阻, 因此在正向电流相同时, 二极管的端电压大于 PN 结的压降。由于二极管表面存在漏电流, 使反向电流比 PN 结的大。

1. 2. 13 何为二极管的理想模型、恒压降模型、折线模型、小信号模型?

答 二极管的理想模型是把二极管视为理想二极管。即正向偏置时, 其管压降为零, 而反向偏置时, 反向电阻视为无穷大, 反向电流为零。当电源电压远大于二极管的管压降时, 可使用理想模型分析。

二极管的恒压降模型是在二极管导通后, 视其管压降为恒定的, 且不随电流而变, 对硅管典型值为 0.7 V, 只有二极管的电流近似等于或大于 1 mA 时才是正确的。

二极管的折线模型是视管压降不是恒定的, 而随二极管电流的增加而增加, 模型用一个电源和电阻 r_d 来近似。

二极管的小信号模型是视特性曲线上静态工作点附近特性曲线为直线, 电压和电流的微小变化为线性关系, 即 $r_d = \Delta u_D / \Delta i_D$, r_d 也可由 $i_D = I_S (e^{u_D/V_T} - 1)$ 导出, 即

$$G_d = \frac{di_D}{du_D} = \frac{d}{du_D} [I_S (e^{u_D/V_T} - 1)] = \frac{I_S}{V_T} e^{u_D/V_T} \approx \frac{i_D}{V_T} = \frac{I_D}{V_T} \quad (\text{在 } Q \text{ 点上})$$

由此可得

$$r_d = \frac{1}{G_d} = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26}{I_D} \quad (T = 300 \text{ K})$$

上述四种模型如图 1. 2. 2 所示。

1. 2. 14 发光二极管的压降与普通二极管相同吗?

答 不相同。普通锗二极管的压降为 0.2 ~ 0.3 V, 普通硅二极管的压降为 0.6 ~ 0.7 V, 而红色发光二极管的压降为 1.6 ~ 1.8 V, 绿色发光二极管的压降约为 2 V。

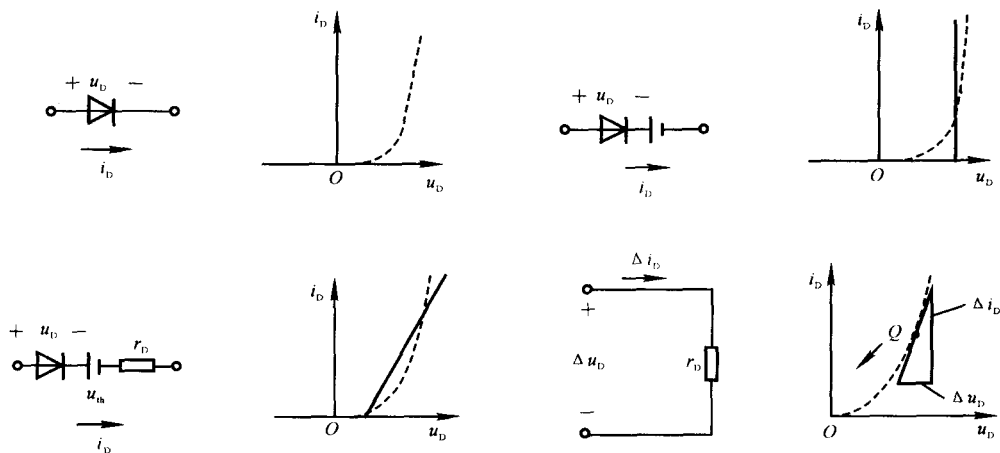


图 1.2.2

1.2.15 把一个 1.5 V 的干电池,以正向接法直接接到一个二极管的两端,会出现何现象?

答 由 PN 结的电流方程 $i_D = I_S(e^{\frac{u_D}{V_T}} - 1)$ 知,1.5 V 远远大于 V_T ,因而 i_D 将极大,导致二极管烧毁或干电池因电流过大而发热失效。切记千万不要以正向接法把电源直接接到二极管的两端,要在回路中串接限流电阻。

1.2.16 稳压二极管工作在稳压区时,稳压二极管两端电压随温度不发生变化,对吗?

答 不对。因稳压二极管的反向击穿电压与温度有关。稳压值小于 4 V 的管子具有负温度系数,即温度升高时稳压值下降;稳压值大于 7 V 的管子具有正温度系数,即温度升高时稳压值上升;只有稳压值在 4 ~ 6 V 之间的管子,温度系数非常小。

1.2.17 稳压二极管工作在稳压区时,为什么一定要串接限流电阻呢?

答 由稳压二极管的反向击穿特性可知,稳压二极管反向击穿后,反向电压稍微增大,反向电流就剧增,若不串接限流电阻将导致烧坏稳压二极管。限流电阻的大小应保证稳压二极管的电流始终在最小稳定电流 I_{Zmin} 与最大稳定电流 I_{Zmax} 之间。

1.2.18 为什么晶体三极管发射区要高掺杂,基区薄且低掺杂,集电结面积大且集电区低掺杂呢?

答 以 NPN 型晶体三极管结构为例,流过发射结的电流由两部分组成,发射区扩散到基区的电流 I_{EN} 和基区扩散到发射区的电流 I_{EP} ,因为只有 I_{EN} 的大部分形成集电极电流,是有用部分,而 I_{EP} 不能形成集电极电流,是无用部分,它形成基极电流,所以只有发射区高掺杂、基区低掺杂才能使有用部分 I_{EN} 在 I_E 中占绝大部分。

基区薄且低掺杂的目的是使发射区扩散到基区的电子与基区的空穴复合机会少,使扩散到基区的电子的绝大部分形成集电极电流。

集电结面积大可有效地收集经基区扩散到集电结边缘的电子。

集电区低掺杂,电阻率高,可使集电结承受较高的反向电压。

1.2.19 既然晶体三极管由两个 PN 结组成,能否用两个背靠背的二极管组成一个晶体三极管呢?

答 不行。两个背靠背的二极管组成一个晶体三极管时,基区太宽了,发射区扩散到基区的载流子在基区被全部复合掉,根本无法到达集电极。

1.2.20 为什么晶体三极管工作在放大区时,发射结正向偏置、集电结反向偏置呢?

答 只有发射结正向偏置,发射区才能向基区扩散载流子,形成发射极电流。只有集电结反向偏置形成的电场才能把发射区向基区扩散的载流子中达到集电结边缘的部分吸引到集电区,形成集电极电流。

1.2.21 为什么晶体三极管工作在饱和区时,基极电流对集电极电流控制能力弱呢?

答 晶体三极管工作在饱和区时,发射结处于正向偏置状态。发射区向基区注入大量载流子,但由于集电结处于正向偏置状态,不能把发射区注入基区的载流子到达集电结边缘的部分全部吸引到集电区,所以基极电流对集电极电流控制能力弱。在放大电路中,晶体三极管处于饱和状态时,集电极电流取决集电极电源、集电极回路阻抗的大小。

1.2.22 晶体三极管的发射极与集电极倒换(置)使用行吗?

答 晶体三极管的发射极与集电极倒换后,除电流放大系数 β 很小外,由于发射结的反向击穿电压较低(约 $5 \sim 9 \text{ V}$),使电源电压较低,使放大器性能下降甚至不能正常工作。

1.2.23 为什么发射结反向击穿电压比集电结的小呢?

答 制作晶体三极管时,由于发射区高掺杂,导致发射结反向击穿电压较小,约 $5 \sim 9 \text{ V}$ 。

1.2.24 为什么说晶体三极管是电流控制器件,而场效应管是电压控制器件呢?

答 因晶体三极管工作在放大区时,基极电流对集电极电流有较强的控制能力,用电流放大系数 β 表示,故称为电流控制器件。场效应管的输入电流为零,输出电流仅受输入电压的控制,故称为电压控制器件。

1.2.25 晶体三极管与场效应管有何区别?

答 (1) 输入电阻相差大。晶体三极管共发射极时,输入电阻约 $10^3 \Omega$ 数量级。结型场效应管的输入电阻达 $10^6 \Omega$ 数量级,而绝缘栅场效应管输入电阻约 $10^9 \Omega$ 数量级。

(2) 晶体三极管内部多子和少子都参与导电,而少数数目受温度、辐射等因素影响大。场效应管只有多子参与导电,所以场效应管的温度稳定性好,抗辐射能力强。

(3) 场效应管的噪声系数小。

(4) 场效应管的漏极与源极可互换使用,互换后特性变化不大。晶体三极管的发射极和集电极,互换后特性变化很大。

(5) 场效应管可以作为压控电阻使用。

1.2.26 温度变化主要影响晶体三极管的哪几个参数?

答 (1) 温度变化使发射结导通电压 $U_{BE(on)}$ 变化,温度每上升 1°C , $U_{BE(on)}$ 下降 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$ 。

(2) 温度变化使电流放大系数 β 值变化,温度每上升 1°C , β 值增大 $0.5\% \sim 1\%$ 。

(3) 温度变化使反向电流 I_{CBO} 变化,温度每上升约 10°C , I_{CBO} 增加约一倍。

1.2.27 选择和使用晶体三极管主要考虑哪些问题?

答 (1) 为防止晶体三极管在使用中损坏,必须使它工作在安全区,即在要求工作电压高时,应选用 $U_{(BR)CEO}$ 大的高反压管,尤其要注意B、E间的反向电压不要超过 $U_{(RR)EBO}$ 。在要求输出大功率时,应选用 P_{CM} 大的功率管,同时满足手册要求的散热条件。在要求大电流输出时,选用 I_{CM} 大的管子。

(2) 工作频率高时,必须选用 f_T 值大的高频管或超高频管;若用于开关电路则选用开关管。

(3) 因硅管温度稳定性好,故尽量用硅管;除非要求导通电压低时选用锗管。

(4) 同型号的管子中选用反向饱和电流小, β 值在几十至100左右的管子。

(5) 当直流电源对地为正值时,选用 NPN 管,反之选用 PNP 管。

1.2.28 晶体三极管代换时掌握哪几个原则?

答 首先查清被替代管子是硅管还是锗管,是 NPN 还是 PNP 结构。尽可能地查到被替代管子的 P_{CM} , I_{CM} , $U_{(BR)CEO}$, f_T , β 数值,应选用大于或接近上述参数的管子。若是高频电路应考虑管子的噪声系数;是否具有 AGC(自动增益控制,即当集电极电流大于或小于一定值后 β 值明显下降)特性。若查不到上述参数数值,可根据电源电压、管子工作电流、信号频率、管子在电路中功能进行估算。

1.2.29 如何安全使用 MOS 场效应管?

答 关键是避免栅极悬空。保存时用细导线将栅极与源极、漏极捆绕短路。焊接人员手腕戴接地环;焊接时烙铁外壳可靠接地(或烙铁预热后,断电焊接);焊接过程中用细导线将栅极与源极、漏极捆绕短路,焊接完后后拆去捆绕细导线。

1.2.30 何为晶体三极管的基区调制效应?

答 基区调制效应产生的原因:晶体三极管工作在放大状态时,当 u_{CE} 增大时,集电结的反向电压也增大,使集电结的宽度增大,主要向基区扩张,使基区变窄,导致在输出特性曲线上集电极电流随 u_{CE} 增大略有增加。在输入特性曲线上,表现为 $u_{CE} > 1\text{ V}$ 以后的曲线上部随 u_{CE} 增大稍有散开。在输出特性曲线放大区, u_{CE} 增大曲线稍有倾斜。

1.2.31 温度过高,本征激发对杂质半导体有何影响?为什么硅管工作温度比锗管高?

答 温度过高,由本征激发产生的少子数目剧增,甚至超过原来杂质电离产生的多子数目。本征激发的作用上升为支配地位,P型和N型半导体就可能转变为本征半导体,半导体器件失去工作能力。由于在同样的条件下,硅材料的本征激发浓度低,所以硅管的最高工作温度可达 150°C ,而锗管仅为 70°C 。

1.3



1.3.1 图 1.3.1(a) 为二极管限幅电路, $u_i(t)$ 波形如图 1.3.1(b) 所示。

- (1) 视二极管 D 为理想二极管时,画出 $u_o(t)$ 的波形。
- (2) 二极管导通压降为 0.7 V ,内阻 $r_d = 20\ \Omega$ 时,画出 $u_o(t)$ 的波形。
- (3) 二极管为理想二极管,但 $u_o(t)$ 两端并接 $50\ \Omega$ 电阻,画出 $u_o(t)$ 波形。

解 (1) 由图 1.3.1(b) 可得, $u_i(t) = t\text{ V}$ 。当 $t \leq 5\text{ s}$ 时, $u_i(t) \leq 5\text{ V}$, D 截止,有 $u_o(t) = u_i(t)$ 。当 $t > 5\text{ s}$ 时, D 导通, $u_o(t) = 5\text{ V}$, $u_o(t)$ 波形如图 1.3.1(c) 所示。

(2) 当 $u_i(t) \leq 5.7\text{ V}$ 时, D 截止, $u_o(t) = u_i(t)$ 。当 $t > 5.7\text{ s}$ 时, D 导通,则

$$u_o(t) = \frac{u_i(t) - 5.7}{200 + 20} \times 20 + 5.7\text{ V}$$

$u_o(t)$ 波形如图 1.3.1(d) 所示。

(3) 因输出端并接 $50\ \Omega$ 负载电阻,当 $t < 25\text{ s}$ 时, D 截止,有

$$u_o(t) = u_i(t) \frac{50}{200 + 50} = \frac{1}{5} t\text{ V}$$

当 $t > 25\text{ s}$ 时, D 导通, $u_o(t) = 5\text{ V}$, $u_o(t)$ 波形如图 1.3.1(e) 所示。

1.3.2 电路如图 1.3.2(a) 所示,其中 $u_z = 3\text{ V}$,二极管压降视为 0,求当 u_i 从 -10 V 变化到 $+10\text{ V}$ 时, u_o 及 i_i 如何变化,并画出 $u_i - u_o$, $i_i - i_o$ 波形图。

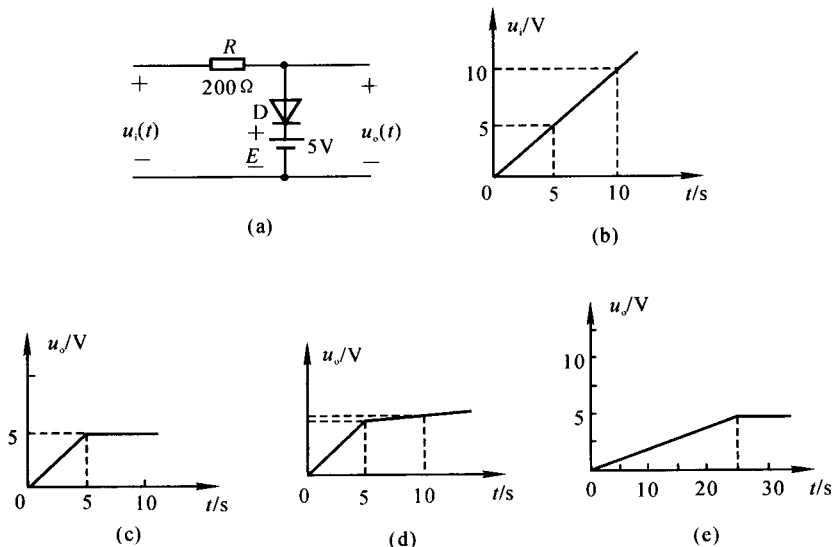


图 1.3.1

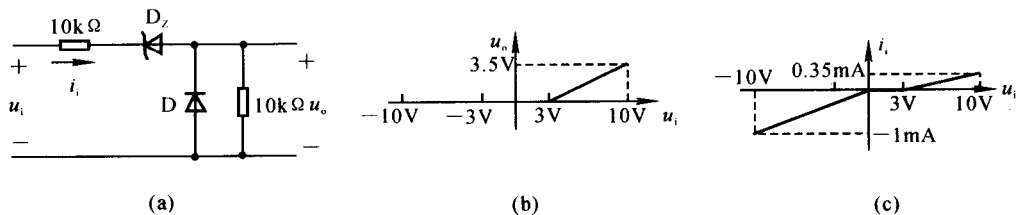


图 1.3.2

解 当 $-10\text{ V} \leq u_i < 0$ 时, D 导通, D_z 正向导通, 因 D 导通压降为 0, 故 $u_o = 0$ 。输入电流 $i_i = -u_i/10 = -0.1u_i$ (mA)。

当 $0 \leq u_i < 3\text{ V}$ 时, D 截止, 相当于开路, 则 $u_o = 0, i_o = 0$;

当 $3\text{ V} \leq u_i < 10\text{ V}$ 时, D_z 反向击穿稳压, 而 D 截止, 则

$$u_o = (u_i - u_z) \frac{10}{10 + 10} = \frac{u_i - 3}{2} \text{ V}$$

$$i_i = \frac{u_i - u_z}{10 + 10} = \frac{u_i - 3}{20} \text{ mA}$$

$u_i - u_o, i_i - i_o$ 波形图如图 1.3.2(b), (c) 所示。

1.3.3 电路如图 1.3.3 所示, 二极管的导通压降为 0.7 V , 利用小信号模型 ($V_T = 26\text{ mV}$), 分别计算 A 点的直流电压 U_A 和交流电压 ΔU_A 。

解 二极管的直流电流 I_D 和 A 点的直流电压 U_A 为

$$I_D = \frac{E - 3U_D}{2} = \frac{10 - 2.1}{2} = 3.95 \text{ mA}$$

$$U_A = E - 3U_D = 10 - 2.1 = 7.9 \text{ V}$$

二极管交流内阻 r_d 和 A 点的交流电压 ΔU_A 为

$$r_d = \frac{26}{I_D} = \frac{26}{3.95} \approx 6.58 \Omega$$

$$\Delta U_A = \frac{\Delta U_i}{R + 3r_d} R = \frac{100}{2000 + 6.58} \times 2000 = 99.67 \text{ mV}$$

由上可见

$$U_A/E = 79\%$$

$$\Delta U_A/\Delta U_i = 99.67\%$$

利用二极管实现了直流电平移动,但对交流信号损失很小,这种电路常用于集成电路。

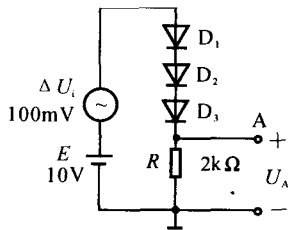


图 1.3.3

1.3.4 试判断图 1.3.4 中二极管处于导通状态还是截止状态,为什么?

解 遇到此类题,先将二极管断开,再计算 AB 端的电位差,若 $U_{AB} > 0$,则二极管处于导通状态;否则处于截止状态。

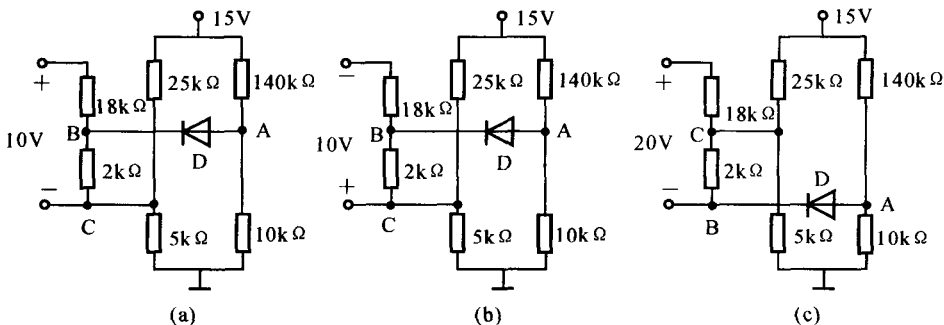


图 1.3.4

图(a): $U_{BC} = 10 \times \frac{2}{20} = 1 \text{ V}$, $U_{AC} = 15 \times \frac{10}{150} - 15 \times \frac{5}{30} = -1.5 \text{ V}$

$$U_{AB} = U_{AC} - U_{BC} = -2.5 \text{ V} < 0$$

二极管处于截止状态。

图(b): $U_{BC} = -10 \times \frac{2}{20} = -1 \text{ V}$, $U_{AC} = 15 \times \frac{10}{150} - 15 \times \frac{5}{30} = -1.5 \text{ V}$

$$U_{AB} = U_{AC} - U_{BC} = -0.5 \text{ V} < 0$$

二极管处于截止状态。

图(c): $U_{BC} = -20 \times \frac{2}{20} = -2 \text{ V}$, $U_{AC} = 15 \times \frac{10}{150} - 15 \times \frac{5}{30} = -1.5 \text{ V}$

$$U_{AB} = U_{AC} - U_{BC} = 0.5 \text{ V} > 0$$

二极管处于导通状态。

1.3.5 电路如图 1.3.5(a) 所示,设二极管压降为 0,试画出 $u_i - u_o$ 的传输特性。

解 因为二极管压降为 0,则

(1) 当 $u_i > 12 \text{ V}$ 时, D_1 导通, D_2 截止,则

$$U_o = \frac{(U_i - 12)}{6 + 12} \times 12 + 12$$

当 $U_i < -10$ V 时, D_1 截止, D_2 导通, 则

$$U_o = -\left[\frac{(-10 - U_i)}{6 + 12} \times 12 + 10\right]$$

当 -10 V $< U_i < 12$ V 时, D_1, D_2 截止, 则

$$U_i = U_o$$

传输特性如图 1.3.5(b) 所示。

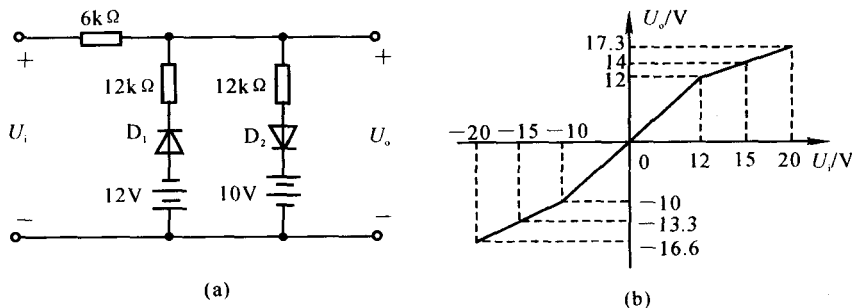


图 1.3.5

1.3.6 要求设计一个稳压二极管稳压电路, 如图 1.3.6 所示, 输出电压为 10 V, 输入电压 U_i 为 (25 ± 5) V, 负载 R_L 变化范围为 $0.5 \text{ k}\Omega \rightarrow \infty$ 。试选择稳压管参数 P_{DZ}, I_{Zmax}, U_Z 及限流电阻 R 数值。

解 因输出电压为 10 V, 故必须选择 $U_Z = 10$ V 的稳压管,

I_{Zmax} 一般取最大负载电流的 2 ~ 3 倍, 则

$$I_{Zmax} = (2 \sim 3) \times \frac{10}{0.5} = (40 \sim 60) \text{ mA}$$

取 $I_{Zmax} = 60 \text{ mA}$ 。

限流电阻数值应保证 I_Z 在 $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ 之间, 即

$$\frac{U_{imax} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}} \leq R \leq \frac{U_{imin} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}}$$

取 $U_{imax} = 30$ V, $U_{imin} = 20$ V, $I_{Lmin} = 0$, $I_{Lmax} = 20 \text{ mA}$, $I_{Zmax} =$

60 mA, $I_{Zmin} = 5 \text{ mA}$, 得

$$333 \Omega \leq R \leq 400 \Omega$$

实取 $R = 360 \Omega$ 。

$$P_{DZmax} = U_Z \frac{U_{imax} - U_Z}{R} = 10 \times \frac{20}{360} = 0.556 \text{ W}$$

选取稳压管 2CW21F: $P_{DZ} = 1 \text{ W}$, $I_{Zmax} = 95 \text{ mA}$, $U_Z = 10 \text{ V}$ 。

或 1N4740: $P_{DZ} = 1 \text{ W}$, $U_Z = 10 \text{ V}$, $I_{Zmax} = 100 \text{ mA}$ 。

1.3.7 在图 1.3.6 中, 若稳压管的动态电阻 $r_Z = 10 \Omega$, 当 $U_i = (25 \pm 5)$ V 时, 求 ΔU_o 大小。

$$\text{解 } \Delta U_o = \Delta U_i \frac{r_Z \parallel R_L}{R + r_Z \parallel R_L} = 5 \times \frac{9.52}{360 + 9.52} = 0.129 \text{ V}$$

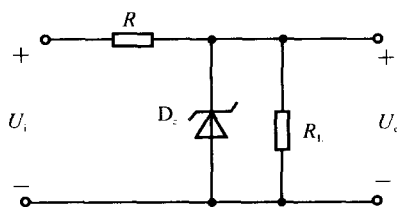


图 1.3.6