



普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套辅导书

《模拟电子技术》 学习指导与题解 (修订版)



主 编 江晓安 付少峰
副主编 杨振江

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套辅导书



《模拟电子技术》学习指导与题解

(修订版)

主 编 江晓安 付少峰

副主编 杨振江



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是西安电子科技大学出版社出版的高等学校教材《模拟电子技术(第四版)》(江晓安编著,西安电子科技大学出版社出版)一书的配套学习指导书,读者也可单独使用本书。书中总结了每章的重点内容,即读者必须掌握的内容,并列举了大量的例题,详细讲述了解题的思路和方法,使读者可举一反三,逐步提高分析问题及解决问题的能力。本书还给出了教材中的全部习题的解答。书末附有三套实考试题。

本书简明实用,适合高等学校有关专业本科生和专科生使用,也可供自学考试等学生使用,还可供其他人员学习模拟电子技术时参考。

图书在版编目(CIP)数据

《模拟电子技术》学习指导与题解 / 江晓安, 付少峰主编. —修订本.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-5606-5146-0

I. ①模… II. ①江… ②付… III. ①模拟电路—电子技术—教学参考资料
IV. ①TN710.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 251946 号

策划编辑 李惠萍 毛红兵

责任编辑 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88248885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018年11月修订版 2018年11月第10次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 11

字 数 259千字

印 数 46 001~49 000

定 价 28.00元

ISBN 978-7-5606-5146-0/TN

XDUP 5448002-10

*** 如有印装问题可调换 ***

前言

前 言

本书是与西安电子科技大学出版社出版的江晓安主编的教材《模拟电子技术(第四版)》配套的学习指导教材。由于第四版教材中的习题部分较前面版本没有变动,所以本书中的题解也未做改变。此次再版只对原书不妥之处进行了修订,并在书后又给出了两套实考试题。

参与本书修订的有江晓安教授和付少峰、杨振江副教授。

欢迎使用本书的同仁和学生提出宝贵意见。

编 者

2018年10月

第一章 频率特性	45
第二章 频率特性	45
第三章 频率特性	45
第四章 频率特性	45
第五章 频率特性	45
第六章 频率特性	45
第七章 频率特性	45
第八章 频率特性	45
第九章 频率特性	45
第十章 频率特性	45
第十一章 频率特性	45
第十二章 频率特性	45
第十三章 频率特性	45
第十四章 频率特性	45
第十五章 频率特性	45
第十六章 频率特性	45
第十七章 频率特性	45
第十八章 频率特性	45
第十九章 频率特性	45
第二十章 频率特性	45
第二十一章 频率特性	45
第二十二章 频率特性	45
第二十三章 频率特性	45
第二十四章 频率特性	45
第二十五章 频率特性	45
第二十六章 频率特性	45
第二十七章 频率特性	45
第二十八章 频率特性	45
第二十九章 频率特性	45
第三十章 频率特性	45
第三十一章 频率特性	45
第三十二章 频率特性	45
第三十三章 频率特性	45
第三十四章 频率特性	45
第三十五章 频率特性	45
第三十六章 频率特性	45
第三十七章 频率特性	45
第三十八章 频率特性	45
第三十九章 频率特性	45
第四十章 频率特性	45
第四十一章 频率特性	45
第四十二章 频率特性	45
第四十三章 频率特性	45
第四十四章 频率特性	45
第四十五章 频率特性	45
第四十六章 频率特性	45
第四十七章 频率特性	45
第四十八章 频率特性	45
第四十九章 频率特性	45
第五十章 频率特性	45
第五十一章 频率特性	45
第五十二章 频率特性	45
第五十三章 频率特性	45
第五十四章 频率特性	45
第五十五章 频率特性	45
第五十六章 频率特性	45
第五十七章 频率特性	45
第五十八章 频率特性	45
第五十九章 频率特性	45
第六十章 频率特性	45
第六十一章 频率特性	45
第六十二章 频率特性	45
第六十三章 频率特性	45
第六十四章 频率特性	45
第六十五章 频率特性	45
第六十六章 频率特性	45
第六十七章 频率特性	45
第六十八章 频率特性	45
第六十九章 频率特性	45
第七十章 频率特性	45
第七十一章 频率特性	45
第七十二章 频率特性	45
第七十三章 频率特性	45
第七十四章 频率特性	45
第七十五章 频率特性	45
第七十六章 频率特性	45
第七十七章 频率特性	45
第七十八章 频率特性	45
第七十九章 频率特性	45
第八十章 频率特性	45
第八十一章 频率特性	45
第八十二章 频率特性	45
第八十三章 频率特性	45
第八十四章 频率特性	45
第八十五章 频率特性	45
第八十六章 频率特性	45
第八十七章 频率特性	45
第八十八章 频率特性	45
第八十九章 频率特性	45
第九十章 频率特性	45
第九十一章 频率特性	45
第九十二章 频率特性	45
第九十三章 频率特性	45
第九十四章 频率特性	45
第九十五章 频率特性	45
第九十六章 频率特性	45
第九十七章 频率特性	45
第九十八章 频率特性	45
第九十九章 频率特性	45
第一百章 频率特性	45

第一版前言

“模拟电子技术”课程是电子信息类各专业重要的专业基础课程。由于该课程与其它相关课程相比较,有许多新的概念和新的分析问题的方法,初学者一时难以接受和消化,故学生普遍反映该课程难学。为帮助读者解难,我们特编写本指导书,其目的在于使读者在本指导书的帮助下,能更好地理解课程内容,掌握分析问题的方法,能独立地完成作业,比较顺利地通过模拟电子技术课程的考试。

本指导书为西安电子科技大学出版社出版的江晓安主编的《模拟电子技术(第二版)》一书的配套辅导教材。考虑到其他读者的需求,本指导书还吸收了其他教材的一些典型题,以例题形式出现并进行分析。读者可与教材配套使用本书,也可单独使用本书。

本指导书在内容编排上力求突出基本概念、基本原理和基本分析方法,引导读者抓住重点、突破难点、掌握解题方法,并注意培养学生分析问题和解决问题的能力。书中每章均先列出该章的基本要求和基本内容;然后是本章小结;接着是典型题举例,通过大量例题详细讲述分析问题和解决问题的思路与方法;最后对配套教材中每章的思考题和习题给出详尽的参考解法和答案。

读者学习“模拟电子技术”课程时,必须以教材为主,学习指导书代替不了教材。只有在认真阅读教材的基础上阅读学习指导书,才会取得好的效果。本书给出了配套教材中的思考题和习题的解答,给读者学习带来一定的帮助,但是阅读题解也代替不了读者自己解题,读者只有通过自己解题,举一反三,才会有深刻的体会和理解,真正掌握解题的思路和方法,达到学习的目的。

参加本书编写工作的有江晓安(第一、二、三、七、八、九、十章)和董秀峰(第四、五、六章)两位同志。本书由江晓安担任主编,负责全书的统稿。在编写过程中得到省考试管理中心王浩和王巨勇同志及西安电子科技大学出版社李惠萍编辑的大力支持和帮助,在此一并致谢。

由于水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2002年3月

目 录

第一章 半导体器件	1	4.1.1 场效应管工作原理	54
1.1 本章小结	1	4.1.2 场效应管放大电路	56
1.1.1 半导体导电性能	1	4.2 典型题举例	57
1.1.2 PN 结	2	4.3 思考题和习题解答	60
1.1.3 半导体三极管	3	第五章 负反馈放大电路	65
1.2 典型题举例	5	5.1 本章小结	65
1.3 思考题和习题解答	8	5.1.1 反馈类型的判定	65
第二章 放大电路分析	17	5.1.2 负反馈对放大器性能的影响	66
2.1 本章小结	17	5.1.3 信号源内阻对反馈效果的影响	67
2.1.1 放大电路的组成原理	17	5.1.4 四种反馈形式的特点	67
2.1.2 放大电路的静态工作状态	18	5.1.5 深度负反馈放大器的电压增益	68
2.1.3 放大电路的动态分析	19	5.1.6 负反馈放大器的自激振荡	68
2.1.4 静态工作点的稳定及其偏置 电路	19	5.2 典型题举例	68
2.1.5 多级放大电路	19	5.3 思考题和习题解答	70
2.2 典型题举例	20	第六章 集成运算放大器	79
2.3 思考题和习题解答	28	6.1 本章小结	79
第三章 频率特性	45	6.1.1 基本概念	79
3.1 本章小结	45	6.1.2 差动放大器的主要指标	80
3.1.1 频率特性的基本概念	45	6.2 典型题举例	81
3.1.2 影响频率特性的因素	45	6.3 思考题和习题解答	83
3.1.3 上限频率 f_h 和下限频率 f_l	45	第七章 运算放大器的应用	91
3.1.4 放大器频率特性的分析方法	46	7.1 本章小结	91
3.2 典型题举例	46	7.1.1 线性运用与非线性运用	91
3.3 思考题和习题解答	48	7.1.2 运算电路	91
第四章 场效应管放大电路	54	7.1.3 有源滤波器	94
4.1 本章小结	54	7.1.4 电压比较器	96
		7.2 典型题举例	97

7.3 思考题和习题解答	98	9.3 思考题和习题解答	134
第八章 波形发生与变换电路	118	第十章 直流电源	140
8.1 本章小结	118	10.1 本章小结	140
8.1.1 非正弦波产生电路	118	10.1.1 单相整流电路	140
8.1.2 正弦波产生电路	118	10.1.2 滤波电路	141
8.1.3 石英振荡电路	119	10.1.3 倍压整流	141
8.2 典型题举例	119	10.1.4 稳压电路	141
8.3 思考题和习题解答	124	10.1.5 集成稳压电路	142
第九章 低频功率放大器	129	10.2 典型题举例	142
9.1 本章小结	129	10.3 思考题和习题解答	146
9.1.1 功放的特征	129	附录 模拟电子技术考题	157
9.1.2 功放分类	129	参考文献	170
9.1.3 互补对称功率放大器	130		
9.2 典型题举例	131		

第一章 半导体器件

“模拟电子技术”课程的核心任务是讲解如何不失真地放大信号。半导体器件就是具有放大信号功能的器件,是组成放大电路的核心器件。我们学习半导体器件的目的是为了正确使用和选择器件,而不是去设计制造半导体器件。因此,我们应着重于了解和掌握管子

的外特性,即管子的电流和各极电压的关系以及管子的主要参数。

本章的主要学习要点如下:

- (1) 半导体的导电特性;
- (2) PN 结的工作原理和主要特性;
- (3) 三极管的工作原理和主要特性。

1.1 本章小结

1.1.1 半导体导电性能

1. 本征半导体

本征半导体是纯净的半导体晶体。常用的半导体材料锗和硅均是四价元素,当它们组成晶体时,每个原子与周围四个原子组成共价键。

在绝对温度 $0\text{ K}(-273^{\circ}\text{C})$ 时,本征半导体中的电子受原子核的束缚,故该半导体不存在能导电的粒子,从而呈现绝缘体的性能。温度增加,电子获能,有少数电子获能较多,可以摆脱原子核的束缚,形成带负电的自由电子和带正电的空穴,它们在电场作用下均作定向运动,所以把自由电子和空穴统称为载流子,载流子在电场作用下的定向运动称为漂移运动,形成的电流称为漂移电流。由于浓度差,产生扩散运动,形成的电流称为扩散电流。显然,本征半导体中自由电子数 n_i 等于空穴数 p_i ,即

$$n_i = p_i$$

产生自由电子和空穴对的同时,部分电子也失去能量返回到共价键处,使自由电子和空穴对消失,我们称此过程为载流子的复合。在一定的温度下,载流子处于动态平衡状态,即每一时刻产生的载流子数和复合的载流子数相等,载流子数稳定在某一常数值。温度增加,载流子数上升,其导电能力也上升。

需要指出的是,空穴导电是束缚电子接力运动的结果,其导电能力低于自由电子。

2. 杂质半导体

在本征半导体中可人为地、有控制地掺入少量的特定杂质,这种掺杂半导体称为杂质

半导体。

在本征半导体中掺入少量的五价元素(又称为施主杂质),形成N型半导体。在室温下杂质基本电离,形成自由电子和不参与导电的正离子。与此同时,也有硅原子中的电子摆脱原子核的束缚,形成自由电子和空穴。所以,N型半导体中自由电子是多数载流子,空穴称为少数载流子,即 $n_n \gg p_n$ 。

同理,在本征半导体中掺入三价元素(又称为受主杂质),形成P型半导体。P型半导体中多数载流子是空穴,少数载流子是自由电子,即 $n_p \ll p_p$ 。

本节要求了解以下概念:本征半导体;杂质半导体;N型半导体;P型半导体;多数载流子和少数载流子;载流子的产生与复合。

1.1.2 PN 结

1. 异型半导体接触现象

P型和N型半导体相接触,其交界面两侧由于载流子的浓度差,将产生扩散运动,形成扩散电流。由于载流子均是带电粒子,因而扩散的同时,将分别留下带正、负电荷的杂质离子,形成空间电荷和自建场。在该电场作用下,载流子作漂移运动,其方向与扩散方向相反,阻止扩散,平衡时扩散运动与漂移运动相等,通过界面的电流为0。这样在交界面处形成了缺少载流子的空间电荷区,此区呈现高阻态,称之为阻挡层(又称为耗尽层)。

2. PN 结的单向导电特性

在PN结两端加正向电压,该电压削弱自建场的作用,故扩散大于漂移,将由多数载流子的扩散运动产生正向电流,且外加电压增大,正向电流也增大,其关系为指数关系。同时阻挡层变薄。

加反向电压时,该电压与自建场方向一致,增强了电场作用,故漂移大于扩散,阻挡层变厚。此时,少数载流子在电场作用下作漂移运动,产生反向电流,由于是少数载流子运动形成电流,故反向电流很小(硅管在 10^{-9} A 数量级,锗管在 10^{-6} A 数量级),且当反向电压 $|U_D| > U_T$ 时,其值基本不变,故将反向电流称为反向饱和电流。

由上可看出,加正向电压时,PN结处于导通状态,其正向电流随正向电压增大而增大;加反向电压时,其反向电流是一个很小的值,PN结处于截止状态,其反向电流基本不随外加电压变化,这就是PN结的单向导电性。

PN结的电流、电压关系为

$$I_D = I_S(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$$

3. PN 结的击穿特性

当反向电压超过某一值后,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿。

击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。击穿时管子不一定损坏,只要电路中加有一定的串联电阻,其电流不要太大,使 $U_D \cdot I$ 小于最大功率损耗,管子就不会因过热而烧坏,当反向电压数值降低时,PN结的单向导电特性可以恢复正常。

4. PN 结的电容效应

PN结的两端电压变化时,引起PN结内电荷变化,此即为PN结的电容效应。

PN 结的电容有两种：势垒电容和扩散电容。

PN 结电压变化，阻挡层厚度也发生变化，从而引起阻挡层内电荷变化。此种电容称为势垒电容 C_T 。

PN 结正向运用时，多数载流子在扩散过程中引起电荷积累，正向电压变化，其积累的电荷也变化，此种电容称为扩散电容 C_D 。

PN 结的结电容用 C_j 表示。一般情况下，PN 结加正向电压时， $C_j \approx C_D$ ；加反向电压时 $C_j \approx C_T$ 。PN 结电容均随外加电压变化而变化。

5. 半导体二极管及其参数

二极管实际就是一个 PN 结。PN 结加上引线和管壳即为二极管。

二极管具有 PN 结的全部特性：单向导电特性、击穿特性和电容效应。

二极管正向运用存在门限电压 U_{on} ，当正向电压大于此值时，二极管电流明显增大，小于 U_{on} 时电流很小。常用 U_{on} 作为二极管导通或截止的界限。

二极管的主要参数有：最大整流电流 I_F ，最大反向工作电压 U_R ，反向电流 I_R ，直流电阻 R_D ，交流电阻 r_d ，最高工作频率 f_M 。

6. 稳压二极管及其主要参数

稳压二极管是利用 PN 结的反向击穿特性。当管子击穿时，反向电流在较大范围内变化，其管子两端电压基本不变，达到稳压的目的。

稳压管的主要参数有：稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z ，电压温度系数 α_U ，动态电阻 r_z ，额定功率损耗 P_Z ，最大稳定电流 I_{Zmax} 。

7. 二极管的应用

二极管的应用基础，就是其单向导电特性，所以分析二极管应用电路时，关键是判断二极管的导通与截止状态。

本节的主要要求是掌握 PN 结的单向导电特性，掌握二极管和稳压二极管的主要参数。对以下概念应搞清楚：漂移运动与扩散运动；漂移电流与扩散电流；直流电阻和交流电阻；阻挡层与外加电压的关系。

1.1.3 半导体三极管

三极管是组成各种电子线路的核心器件。

1. 三极管的结构及类型

三极管有两个互相影响的 PN 结：发射结和集电结；三个区域（引出线为对应的极）：发射区（引出发射极）、基区（引出基极）和集电区（引出集电极）。

三极管分为 NPN 和 PNP 两大类，它们的区别是：形成电流的载流子不同，外加电压极性相反，各极电流方向相反。

2. 三极管的放大作用

为实现放大，三极管应满足下列条件：

(1) 发射区重掺杂；

(2) 基区很薄；

(3) 集电结面积大;

(4) 发射结正向偏置, 集电结反向偏置。

工作过程如下: 由于 e 结正向运用, 且 e 区重掺杂, 因而发射区的多数载流子大量扩散注入至基区, 又由于 c 结反向运用, 故注入至基区的载流子在基区形成浓度差, 所以注入的载流子在基区扩散至集电结, 被电场拉至 c 区形成集电极电流。由于基区很薄, 因此注入的载流子在基区复合得较少, 绝大多数均被 c 结收集。

电流分配关系如下:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

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

其中, I_{CBO} 为 c 结少数载流子形成的反向饱和电流; I_{CEO} 为 $I_B = 0$ 时, c、e 极之间的穿透电流; α 为共基极电流放大系数; β 为共发射极电流放大系数。 α 、 β 的定义为

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

注意 α 、 β 有两种定义:

一种是直流电流之比, 称为直流放大系数:

$$\bar{\alpha} = \frac{\text{直流集电极电流 } I_C}{\text{直流发射极电流 } I_E}$$

$$\bar{\beta} = \frac{\text{直流集电极电流 } I_C}{\text{直流基极电流 } I_B}$$

另一种是变化量(交流)之比, 称为交流放大系数:

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

显然交流放大系数(α 、 β)与直流放大系数($\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$)的含义是不同的。由于一般情况下, $\alpha \approx \bar{\alpha}$, $\beta \approx \bar{\beta}$, 因此常常不区分 α 与 $\bar{\alpha}$, β 与 $\bar{\beta}$ 。

3. 特性曲线

三极管的特性曲线与三极管的接法有关, 我们主要讲述用得最多的共发射极的特性。

(1) 输入特性:

$$I_B = f(U_{BE}) \big|_{U_{CE}=C} \quad (C \text{ 表示常数})$$

输入特性与 PN 结的正向特性相似, 由于三极管的两个 PN 结互相影响, 因此输出电压 U_{CE} 对输入特性有影响, 且 $U_{CE} > 1 \text{ V}$ 时输入特性基本重合。一般输入特性用 $U_{CE} = 0 \text{ V}$ 和 $U_{CE} \geq 1 \text{ V}$ 两条特性曲线表示。

(2) 输出特性:

$$I_C = f(U_{CE}) \big|_{I_B=C}$$

输出特性可分为三个区域:

- 截止区。 $I_B \leq 0$ 的区域称为截止区, 此时集电极电流近似为零, 管子的集电极电压

就等于电源电压，两个结均反向偏置。

• 饱和区。此区 $U_{CE} \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$ ，此时 $I_C = \beta I_B$ 关系不成立，而是由外电路确定， $U_{CE} \approx 0.3 \text{ V}$ ，两个结均处于正向偏置。

• 放大区。此区 $I_C = \beta I_B$ ， I_C 基本不随 U_{CE} 变化而变化，即特性曲线的平坦部分，可利用此特性组成恒流源。此时发射结正向偏置，集电结反向偏置。

4. 三极管的主要参数

(1) 电流放大系数 α 或 β ：主要表征管子的放大能力，一般二者关系为

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

(2) 极间反向电流：

I_{CBO} ——集电极—基极反向饱和电流。

I_{CEO} ——穿透电流，与 I_{CBO} 的关系为

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

它们是由少数载流子形成的，与温度有关。

(3) 极限参数：

I_{CM} ——集电极最大允许电流。

P_{CM} ——集电极最大允许功率损耗。

BU_{CBO} 、 BU_{CEO} 、 BU_{EBO} ——三极管的击穿电压。

I_{CM} 、 P_{CM} 、 BU_{CEO} 共同确定三极管的安全工作区。

5. 参数与温度的关系

上述各参数与温度的关系如下：

$$T(\text{温度}) \uparrow \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \beta \uparrow \\ I_{CBO} \uparrow, I_{CEO} \uparrow \\ |U_{BE}| \downarrow \end{array} \right\} \rightarrow I_C \uparrow$$

本节主要要求读者掌握三极管的工作原理；能正确判断管子工作在什么区域；正确理解三极管主要参数。

1.2 典型题举例

例 1 在半导体中掺入三价元素后的半导体称为_____。

- ① 本征半导体 ② P 型半导体 ③ N 型半导体 ④ 半导体

答案：②

例 2 少数载流子是空穴的半导体是在_____。

- ① 本征半导体中掺入三价元素，是 P 型半导体
② 本征半导体中掺入三价元素，是 N 型半导体
③ 本征半导体中掺入五价元素，是 N 型半导体

④ 本征半导体中掺入五价元素, 是 P 型半导体

答案: ③

例 3 P 型半导体多数载流子是带正电的空穴, 所以 P 型半导体_____。

① 带正电

② 带负电

③ 没法确定

④ 为电中性

答案: ④

例 4 PN 结加正向电压时, 其正向电流是由_____的。

① 多数载流子扩散而成

② 多数载流子漂移而成

③ 少数载流子扩散而成

④ 少数载流子漂移而成

答案: ①

例 5 如果 PN 结反向电压的数值增大(小于击穿电压), 则_____。

① 阻挡层不变, 反向电流基本不变

② 阻挡层变厚, 反向电流基本不变

③ 阻挡层变窄, 反向电流增大

④ 阻挡层变厚, 反向电流减小

答案: ②

例 6 二极管的反向饱和电流在 20°C 时是 $5\mu\text{A}$, 温度每升高 10°C , 其反向饱和电流值增大一倍, 当温度为 40°C 时, 反向饱和电流值为_____。

① $10\mu\text{A}$

② $15\mu\text{A}$

③ $20\mu\text{A}$

④ $40\mu\text{A}$

答案: ③

例 7 理想二极管电路如图 1-1 所示, 已知输入为正弦波 $u_i = 30 \sin \omega t$ (V), 试画出输出电压 u_o 的波形。

解: 关键在于判断二极管 V_{D1} 、 V_{D2} 的导通与截止状况。如 V_{D1} 导通, $u_o = 20\text{V}$; V_{D2} 导通, $u_o = 5\text{V}$; 只有 V_{D1} 、 V_{D2} 均截止时, $u_o = u_i$ 。

$u_i \geq 20\text{V}$ 时, V_{D1} 正偏导通, V_{D2} 反偏截止, 所以输出 u_o 等于 20V 。

$u_i \leq 5\text{V}$ 时, V_{D1} 反偏截止, V_{D2} 正偏导通, 所以输出为 5V 。

当 $5\text{V} < u_i < 20\text{V}$ 时, V_{D1} 、 V_{D2} 均反偏截止, 输出 u_o 等于输入 u_i , 其波形图如图 1-2 所示。

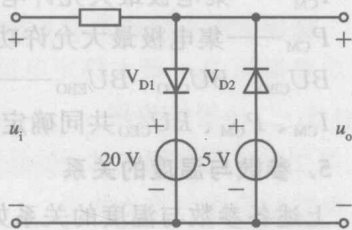


图 1-1 例 7 图

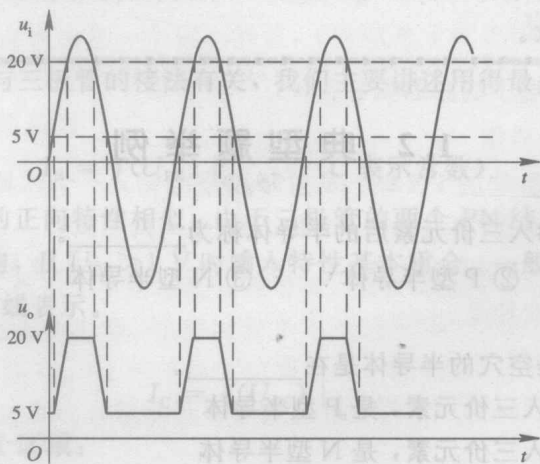


图 1-2 波形图

例 8 理想二极管电路如图 1-3 所示, 试问输出端电压 $U_o = ?$ (设管子导通时管压降为 0 V)

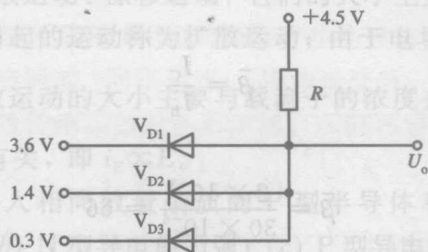


图 1-3 例 8 图

解: 如孤立地看, V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{D3} 每管均为正向偏置, 处于导通状态。实际上, 它是一个整体, 互相有影响, 当输入电压不相同, 只可能有一只二极管导通, 即正向电压最大的二极管导通, 其余的均截止。对此例, V_{D3} 管压降 $U_3 = 4.2 \text{ V}$ 最大, 故该管导通, $U_o = 0.3 \text{ V}$, V_{D1} 、 V_{D2} 截止。

如在分析时, 认为 V_{D1} 导通, 则 $U_o = 3.6 \text{ V}$, 此时 V_{D2} 、 V_{D3} 仍正向偏置, 而 V_{D2} 导通, $U_o = 1.4 \text{ V}$, 此电压使 V_{D1} 截止, 但仍能使 V_{D3} 导通。而 V_{D3} 导通, $U_o = 0.3 \text{ V}$, 此电压使 V_{D1} 、 V_{D2} 均截止, 所以, 此电路只能 V_{D3} 导通, $U_o = 0.3 \text{ V}$ 。

例 9 要使三极管正常放大信号, 要求三极管 _____、_____、_____、_____。

- ① 发射极重掺杂 ② 基区很薄
- ③ 集电结面积大于发射结面积 ④ 发射结、集电结均正向运用
- ⑤ 发射结正向运用, 集电结反向运用

答案: ① ② ③ ⑤

例 10 测得三极管的三个电极电位为 $U_x = 5 \text{ V}$, $U_y = 1.2 \text{ V}$, $U_z = 1 \text{ V}$, 试判断该管是锗管还是硅管, 是 PNP 管还是 NPN 管, 并确定 e、b、c 极。

答: 这类题型首先应找出发射结, 相差为 0.7 V (硅管) 或 0.2 V (锗管) 的两个极为发射结, 按其相差的数值确定是锗管还是硅管。发射结确定后, 则第三个极必定是集电极。再根据 NPN 三极管 $U_C > U_B > U_E$, PNP 三极管 $U_C < U_B < U_E$, 确定出是 NPN 三极管还是 PNP 三极管, 最后即可确定 e、b、c 极。

对该题按上述过程可判断出:

- ① 因为 $U_y - U_z = 0.2 \text{ V}$, 故该管为锗(Ge)管。
- ② U_x 为集电极电位, 且电位最高, 故为 NPN 三极管。
- ③ NPN 管 $U_C > U_B > U_E$, 故 x 为集电极, y 为基极, z 为发射极。

例 11 晶体管工作在放大区, 测得当 $I_B = 10 \mu\text{A}$ 时 $I_C = 1 \text{ mA}$, $I_B = 30 \mu\text{A}$ 时 $I_C = 2 \text{ mA}$, 求该管交流放大系数 β 和直流放大系数 $\bar{\beta}$, 该管穿透电流 I_{CEO} 为多大?

解: 按交流放大系数定义:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

则

$$\beta = \frac{(2-1) \times 10^{-3}}{(30-10) \times 10^{-6}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} = 50$$

由直流放大系数定义:

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

当 $I_B = 30 \mu\text{A}$ 时,

$$\bar{\beta} = \frac{2 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-6}} = 66$$

可能读者会问,教材讲了一般情况下 $\beta = \bar{\beta}$,而此处为何相差如此之大,且 $\bar{\beta}$ 不是一个常数。这主要是 I_{CEO} 太大所致。所以,当 I_{CEO} 太大时 $\beta = \bar{\beta}$ 不成立,且 $\bar{\beta}$ 随直流工作点而变化。

下面求该管的 I_{CEO} :

$$I_C = \beta I_B + I_{\text{CEO}}$$

则

$$I_{\text{CEO}} = I_C - \beta I_B = 1 \times 10^{-3} - 50 \times 30 \times 10^{-6} = 0.5 \text{ mA}$$

或

$$I_{\text{CEO}} = 2 \times 10^{-3} - 50 \times 30 \times 10^{-6} = 0.5 \text{ mA}$$

例 12 三极管参数为 $P_{\text{CM}} = 800 \text{ mW}$, $I_{\text{CM}} = 100 \text{ mA}$, $BU_{\text{CEO}} = 30 \text{ V}$, 在下列几种情况中,属于工作正常的是_____。

① $U_{\text{CE}} = 15 \text{ V}$, $I_C = 150 \text{ mA}$

② $U_{\text{CE}} = 20 \text{ V}$, $I_C = 80 \text{ mA}$

③ $U_{\text{CE}} = 35 \text{ V}$, $I_C = 100 \text{ mA}$

④ $U_{\text{CE}} = 10 \text{ V}$, $I_C = 50 \text{ mA}$

答案: ④

1.3 思考题和习题解答

1. 什么是本征半导体? 什么是杂质半导体? 各有什么特征?

答: 本征半导体是纯净的半导体晶体, 而杂质半导体是在本征半导体中, 人为地掺入少量的三价或五价元素而形成的。本征半导体中参与导电的是自由电子和空穴, 且自由电子数等于空穴数。杂质半导体根据掺入的杂质不同其导电特性也不同, 掺入三价元素, 空穴数多于自由电子数, 参与导电的主要是空穴, 所以称为 P 型半导体; 掺入五价元素, 自由电子数多于空穴数, 参与导电的主要是自由电子, 所以称为 N 型半导体。

2. N 型半导体是在本征半导体中掺入_____价元素, 其多数载流子是_____, 少数载流子是_____。

答案: 五; 自由电子; 空穴

3. P 型半导体是在本征半导体中掺入_____价元素, 其多数载流子是_____, 少数载流子是_____。

答案: 三; 空穴; 自由电子

4. 在室温附近, 温度升高, 杂质半导体中的_____浓度明显增加。

答案：少数载流子

5. 什么叫载流子的扩散运动、漂移运动？它们的大小主要与什么有关？

答：由载流子浓度差引起的运动称为扩散运动；由于电场存在，载流子在电场作用下的运动称为漂移运动。扩散运动的大小主要与载流子的浓度差有关，即 $i_d \propto \frac{dP}{dX} \left(\frac{dN}{dX} \right)$ ；漂移运动主要与电场的大小有关，即 $i_e \propto E$ 。

6. 在室温下，对于掺入相同数量杂质的 P 型半导体和 N 型半导体，其导电能力_____。(a) 二者相同；(b) N 型导电能力强；(c) P 型导电能力强

答案：(b)

解释 因为自由电子运动比空穴运动(束缚电子运动)容易得多，自由电子导电能力强于空穴，所以在掺杂浓度相同的前提下，N 型半导体导电能力好于 P 型半导体。

7. PN 结是如何形成的？在热平衡下，PN 结有无净电流流过？

答：P 型和 N 型半导体接触时，在交界面两侧，由于自由电子和空穴的浓度相差悬殊，则将产生扩散运动。自由电子由 N 区向 P 区扩散，空穴由 P 区向 N 区扩散。由于自由电子和空穴均是带电粒子，因而自由电子由 N 区向 P 区扩散的同时，在 N 区剩下带正电的杂质离子；同样，空穴由 P 区向 N 区扩散的同时，在 P 区剩下带负电的杂质离子，这就形成了空间电荷区。故在 P 区和 N 区交界处形成 N 正 P 负的电场(称为自建场)。在此电场作用下，载流子将作漂移运动，其方向与扩散运动方向相反，阻止了扩散运动。扩散越多，电场越强，漂移运动越强，对扩散的阻力越大。平衡时，扩散运动与漂移运动相等，通过界面的载流子为 0，即 PN 结的电流为 0，这就是 PN 结的形成过程。

热平衡时，通过界面的载流子数为 0，所以净电流也为 0。

8. PN 结未加外部电压时，扩散电流_____漂移电流；加正向电压时，扩散电流_____漂移电流，其耗尽层_____；加反向电压时，扩散电流_____漂移电流，其耗尽层_____。

答案：等于；大于；变薄；小于；变厚

9. 什么是 PN 结的击穿现象？击穿有哪两种？击穿是否意味着 PN 结坏了？为什么？

答：PN 结的反向电压加到某一数值时，反向电流突然剧增，这种现象称为击穿现象。击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种，前者是载流子在强电场作用下高速运动，具有很大的动能，在与硅原子(或锗原子)碰撞时，将载流子打出来，新的载流子再作高速运动；与半导体原子碰撞时，仍会打出新的载流子，这样一变二、二变四……载流子大增，所以电流急剧增加。后者是在电场作用下，直接将载流子从半导体材料的原子中拉出来，使载流子大增，电流急剧增大。

击穿不一定损坏 PN 结，只要在电路中串入一个适当的限流电阻即可，使流过二极管的反向电流与反向电压的乘积不超过允许功率损耗，管子就不会损坏。

10. 什么是 PN 结的电容效应？何谓势垒电容、扩散电容？PN 结正向运用时，主要考虑何种电容？反向运用时，主要考虑何种电容？

答：当外加电压变化，引起 PN 结两侧电荷变化，这种现象称为 PN 结的电容效应。

势垒电容：外加电压变化，引起阻挡层厚度变化，从而引起阻挡层内电荷变化，这种电容效应称为势垒电容。

扩散电容:外加电压变化,载流子扩散也变化,从而引起阻挡层外电荷变化,这种电容效应称为扩散电容。

显然,反向运用时主要考虑势垒电容;正向运用时主要考虑扩散电容。

11. 二极管的直流电阻 R_D 和交流电阻 r_d 有何不同? 如何在伏安特性曲线上表示出来?

答: 直流电阻 R_D 是二极管两端的直流电压与流过二极管的直流电流之比, 即

$$R_D = \frac{U_F}{I_F}$$

其在伏安特性曲线上的表示如图 1-4(a) 所示。

交流电阻 r_d 是二极管工作点附近电压的微变值 ΔU 与相应的微变电流值 ΔI 之比, 即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

其在伏安特性曲线上的表示如图 1-4(b) 所示。

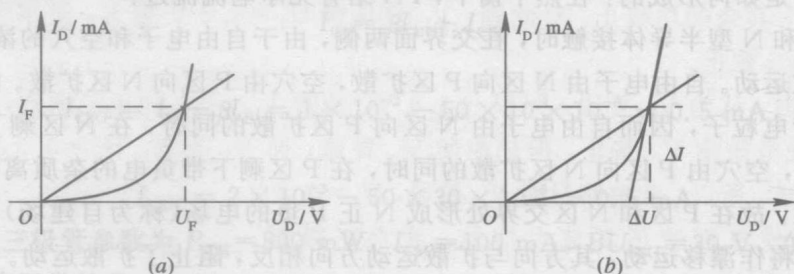


图 1-4 交、直流电阻在伏安特性曲线上的表示

一般情况下这种电阻是非线性的, 其值均随工作电流加大而减小, 且 $R_D > r_d$ 。

12. 二极管的伏安特性方程为

$$I_D = I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

试推导二极管正向导通时的交流电阻

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{U_T}{I_D}$$

室温下 $U_T = 26 \text{ mV}$, 当正向电流为 1 mA 、 2 mA 时, 估算其电阻 r_d 的值。

解:

$$dI_D = d[I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)] = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} dU \approx \frac{I_D}{U_T} dU$$

即

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D}$$

$I_D = 1 \text{ mA}$ 、 2 mA 时, r_d 的值分别为

$$r_{d1} = \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 26 \Omega$$

$$r_{d2} = \frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 13 \Omega$$

13. 稳压二极管是利用了二极管的_____特性。

((a) 正向导通; (b) 反向截止; (c) 反向击穿)