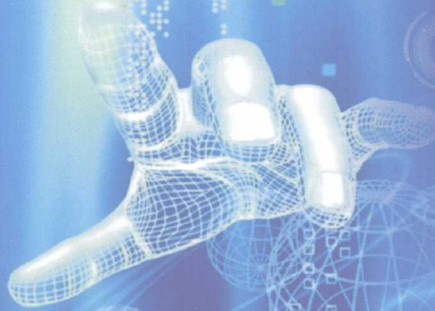


模拟电子技术

学习方法与解题指导 第2版

王鲁杨 主编

王鲁杨 杨国光 王禾兴 编著



Electronic
Technology



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

21 世纪课程教材系列辅导丛书

模拟电子技术学习方法与解题指导

(第 2 版)

王鲁杨 主编

王鲁杨 杨国光 王禾兴 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是“模拟电子技术”课程的学习指导书,为配合该课程的教学而编写,从学生“学”的角度提供了全面的辅导。全书共分9章,基本覆盖了模拟电子技术课程的全部内容。每章包括理论要点、基本要求、典型例题、习题及答案四个部分。书中通过大量的例题帮助读者掌握“模拟电子技术”课程的基本概念、基本原理和基本分析方法;通过习题使读者练习并检查学习情况。例题与习题的内容由浅到深,适合于不同需要的读者。书中还含有4套模拟试题(其中,A,B两套适用于高职、高专;C,D两套适用于本科),可帮助读者熟悉“模拟电子技术”课程考试的基本情况。

本书可作为学习“模拟电子技术”课程的高等学校本科、高职、高专以及电大、职大、函大、夜大、成人教育学院学生的辅助教材,也可作为有关教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术学习方法与解题指导/王鲁杨主编. —2
版. —上海:同济大学出版社,2009.3
(21世纪课程教材系列辅导丛书)
ISBN 978-7-5608-3928-8

I. 模… II. 王… 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(2008)第 189492 号

模拟电子技术学习方法与解题指导(第2版)

王鲁杨 主编

责任编辑 张平官 责任校对 徐春莲 封面设计 张一沁

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 14

字 数 280 000

印 数 1—3 100

版 次 2009 年 3 月第 2 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3928-8

定 价 25.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

版权所有 侵权必究

再版前言

本书自 2004 年初版问世以来,受到了广大读者的欢迎,也得到了同行的一致好评,不少学校将本书选作“模拟电子技术”课程的辅导教材。对此,我们表示衷心的感谢!

在本书初版时,由于时间仓促,加之编者水平有限,书中存在一些不应该出现的差错和疏误,个别地方的物理量符号、计量单位的符号等使用不规范,部分电路图元件符号使用不符合国标的要求,对此,编者在本次修订中给予更正,希望尽量做到正确无误、规范标准。

近年来,随着高职教育的大力推进,“模拟电子技术”课程教学受众越来越广泛,虽然本书编写的初衷是帮助大学本科学学生作该课程的学习辅导之用,但相信,本书也能帮助广大高职学生顺利学好“模拟电子技术”课程。

感谢同济大学出版社及张平官先生在本书修订出版中给予的支持和帮助。

王鲁杨于上海

2008.12.10

前 言

本书是根据 1995 年国家教委批准颁布的修订后的《高等学校工科电子技术基础课程教学基本要求》编写的辅导教材,是学生学习“模拟电子技术”课程的指导书。

“模拟电子技术”课程中概念较多,分析方法多,器件和电路类型较复杂,尤其现在课时一再压缩,使学生普遍感到该课程难学,最集中的体现就是课后习题不会做。为帮助学生方便系统地学好本课程,掌握基本概念,掌握解答各类题型的思路、方法、规律和技巧,培养学生分析问题、解决问题的实际能力,我们编写了此书。

全书共分 9 章,内容包括半导体器件、基本放大电路、多级放大电路和集成电路运算放大器、功率放大电路、放大电路的频率响应、放大电路中的反馈、集成运放的线性应用、信号产生电路和直流稳压电源。各章均设有理论要点、基本要求、典型例题、习题及答案四个部分。

在每章的理论要点中,系统地总结了该章的主要内容,突出了重点和难点;基本要求部分,说明了对不同内容的要求程度;典型例题部分由浅到深地编入各种类型的题目,讲述基本概念、基本分析方法在解题过程中的应用;通过习题部分,进一步培养学生分析问题、解决问题的实际能力。

本书的内容是基于国内应用较广的教材提炼总结的,如康华光主编的《电子技术基础模拟部分(第四版)》(高等教育出版社,1999 年)、宋学军主编的《模拟电子技术》(科学出版社,1999 年)等。它适用于本科、专科、高职和成人高等教育院校的学生自学、复习和备考。

书中的第 1 章、第 2 章、第 6 章由杨国光编写,第 3 章、第 5 章、第 8 章由王禾兴编写,第 4 章、第 7 章、第 9 章、模拟试卷 A,B,C,D 及答案由王鲁杨编写。全书由王鲁杨任主编。

由于编者水平有限,书中会有各种不足和缺陷,敬请有关专家和读者批评、指正。

编 者

2004 年 4 月

目 录

再版前言

前 言

1 半导体二极管及其基本电路	(1)
1.1 理论要点	(1)
1.1.1 半导体的基本知识	(1)
1.1.2 半导体二极管	(3)
1.1.3 二极管基本电路的分析方法	(4)
1.2 基本要求	(5)
1.3 典型例题	(6)
1.4 习题及答案	(9)
2 半导体三极管及放大电路基础	(14)
2.1 理论要点	(14)
2.1.1 半导体三极管 BJT	(14)
2.1.2 BJT 基本放大电路	(16)
2.1.3 放大电路的图解分析法	(16)
2.1.4 放大电路的近似估算分析法	(19)
2.1.5 多级放大电路计算	(25)
2.2 基本要求	(26)
2.3 典型例题	(27)
2.4 习题及答案	(31)
3 集成电路运算放大器	(48)
3.1 理论要点	(48)
3.1.1 多级放大电路	(48)
3.1.2 差动放大电路	(48)
3.1.3 集成电路运算放大器	(51)
3.2 基本要求	(52)
3.3 典型例题	(53)
3.4 习题及答案	(59)
4 功率放大电路	(65)

4.1	理论要点	(65)
4.1.1	功率放大电路的主要问题	(65)
4.1.2	放大器的三种工作状态	(65)
4.1.3	乙类互补对称功率放大电路	(66)
4.1.4	乙类互补对称功率放大电路存在的问题及对策	(66)
4.2	基本要求	(67)
4.3	典型例题	(67)
4.4	习题及答案	(71)
5	放大电路的频率响应	(78)
5.1	理论要点	(78)
5.1.1	基本概念	(78)
5.1.2	单级放大电路的频率响应	(79)
5.1.3	多级放大电路的频率响应	(83)
5.2	基本要求	(83)
5.3	典型例题	(83)
5.4	习题及答案	(89)
6	放大电路中的反馈	(95)
6.1	理论要点	(95)
6.1.1	反馈的基本概念	(95)
6.1.2	反馈的判别	(95)
6.1.3	负反馈放大电路的方框图及增益的一般表达式	(96)
6.1.4	负反馈对放大电路性能的影响	(97)
6.1.5	负反馈放大电路在深度负反馈条件下的近似计算	(97)
6.2	基本要求	(99)
6.3	典型例题	(99)
6.4	习题及答案	(103)
7	集成运放的线性应用	(111)
7.1	理论要点	(111)
7.1.1	集成运放在信号运算方面的应用	(111)
7.1.2	集成运放在信号处理方面的应用	(114)
7.2	基本要求	(116)
7.3	典型例题	(117)
7.4	习题及答案	(127)

8 信号产生电路	(137)
8.1 理论要点	(137)
8.1.1 正弦波振荡电路	(137)
8.1.2 非正弦信号产生电路	(140)
8.2 基本要求	(143)
8.3 典型例题	(144)
8.4 习题及答案	(157)
9 直流稳压电源	(170)
9.1 理论要点	(170)
9.1.1 电源变压器	(170)
9.1.2 整流电路	(170)
9.1.3 滤波电路	(171)
9.1.4 稳压电路	(172)
9.2 基本要求	(173)
9.3 典型例题	(174)
9.4 习题及答案	(180)
附录 模拟试卷 A(高职高专)	(189)
试卷 A 的答案	(193)
模拟试卷 B(高职高专)	(195)
试卷 B 的答案	(199)
模拟试卷 C(本科)	(202)
试卷 C 的答案	(207)
模拟试卷 D(本科)	(210)
试卷 D 的答案	(214)
参考文献	(216)

1 半导体二极管及其基本电路

1.1 理论要点

1.1.1 半导体的基本知识

1. 半导体材料

根据物体导电能力(电阻率)的不同,来划分导体、绝缘体和半导体。

半导体材料有元素半导体和化合半导体。硅是最常用的一种半导体材料。

2. 半导体的共价键结构

硅和锗是四价元素,外层原子轨道上有四个电子(价电子)。

半导体材料都制成晶体。构成共价键结构。

3. 本征半导体、空穴及其导电作用

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体。

在室温下,由于光和热的激发,部分价电子挣脱共价键的束缚离开原位成为自由电子,此现象称为本征激发。同时在原来的位置上留下一个空位,称为空穴。

束缚电子能迁入空位形成新的空穴,相当于空穴移动。空穴可看成一个带正电的粒子,其所带电量与电子相等,符号相反。

自由电子和空穴总称为载流子(载运电流的粒子)。

本征半导体内自由电子和空穴是成对出现的,即载流子的产生;它也是成对消失的,即载流子的复合。

温度增加,本征激发产生的载流子增加,导电能力增强。

4. 杂质半导体

杂质半导体分成两类:电子型半导体(N型半导体)和空穴型半导体(P型半导体)。

在四价半导体内掺入少量三价元素。构成P型半导体。一个杂质原子提供一个空穴。晶体中还有本征激发产生的少量电子空穴对。所以,P型半导体中空穴为多数载流子(多子),自由电子为少数载流子(少子)。

在四价半导体内掺入少量五价元素。构成N型半导体。一个杂质原子提供一个自由电子。N型半导体中自由电子为多数载流子(多子),空穴为少数载流子(少子)。

本征半导体中掺入少量杂质,载流子浓度将大大增加。导电能力大大提高。

5. 扩散运动和漂移运动

浓度差作用下载流子的定向运动称扩散运动,所形成的电流称扩散电流。

在电场作用下载流子的定向运动称漂移运动,所形成的电流称漂移电流。

6. PN 结的形成

一块基片,一部分掺入五价元素成为 N 型半导体,另一部分掺入三价元素成为 P 型半导体。

分界面两侧载流子浓度不等,产生扩散并复合,留下正负离子不能移动,形成空间电荷区,构成内电场。内电场阻止多子扩散,促进少子漂移。当扩散与漂移平衡,空间电荷区宽度稳定。

空间电荷区又称 PN 结、耗尽层、阻挡层、势垒区。

7. PN 结的单向导电性

外加正向电压(正向偏置),P 区电位高于 N 区电位。

外加电场与 PN 结内电场方向相反,PN 结平衡打破。P 区空穴、N 区电子流向 PN 结,PN 结变薄,多子扩散大于少子漂移,形成正向电流 I_F 。

在正常工作范围内,外加正向电压稍有变化会引起电流显著变化。

外加反向电压(反向偏置)N 区电位高于 P 区电位。

外加电场与 PN 结内电场方向相同,PN 结变宽,多子扩散受阻而趋于零,少子漂移加强,形成反向漂移电流 I_R 。

反向电流由少子漂移构成,数量很小,其大小与外加电压基本无关,而与温度有关,温度增加,反向电流增大。

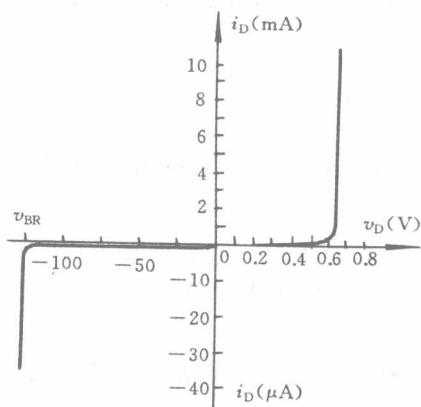


图 1-1 PN 结伏安特性

PN 结正向电阻小(导通),反向电阻大(截止),具有单向导电性,其伏安特性如图 1-1 所示。

8. PN 结伏安特性的表达式

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

式中 i_D ——PN 结电流;

v_D ——PN 结两端外加电压;

V_T ——温度的电压当量,常温下为 26mV;

e ——自然对数底;

I_S ——反向饱和电流。

PN 结伏安特性表达式体现了 PN 结的单向导电性。

为了使 PN 结的电压、电流关系较为明确,假设 $I_S = 1\text{nA}$, $V_T = 26\text{mV}$,代入伏安特性表达式计算,在表 1-1 中列出一组数据。

表 1-1 PN 结电压电流的典型数据

PN 结电压 $v_D(\text{V})$	0.419	0.437	0.5	0.6	0.7	0.8
PN 结电流 $i_D(\text{A})$	0.01	0.02	0.225	10.5	492	23062

从表 1-1 所列数据可见,当 PN 结电压 v_D 从 0.419V 增加到 0.437V 时,电压仅增加了 4.3%,但 PN 结电流 i_D 增大了一倍。从 PN 结伏安特性的指数表达式可知,PN 结电压每增大 0.1V,PN 结电流将增大 46.8 倍。当 PN 结电压 v_D 增加到 0.6V 时,正向电流为 10.5A,对于小功率管来说已太大了。而当 PN 结电压增加到 0.8V 时,PN 结电流的计算值有 2 万 A 以上,但实际上已不可能有这样的 PN 结的器件了。由此可见,PN 结(或二极管)的正向电压降只可能是零点几伏(发光二极管的压降略大),太高的正向压降在实际上是不可能存在的。

在学习 PN 结伏安特性表达式时,应对表达式与图形的关系以及实际数量大小有一个准确的概念。这也是学习电子技术、分析和计算电子电路时所必须注意的问题。

9. PN 结的反向击穿

反向电压增大到某值时,反向电流会大大增加,此现象称为反向击穿。这时的电压称为反向击穿电压 V_{BR} 。

击穿可分为雪崩击穿和齐纳击穿,它们都属于电击穿。电击穿可逆,一般情况下要避免,热击穿不可逆,应严格避免。

1.1.2 半导体二极管

1. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性也就是 PN 结的伏安特性。

正向特性:起始部分外加正向电压小,PN 结减薄少,仍呈现为大电阻。有一门坎电压(死区电压)存在。正向电压大于门坎电压时,PN 结厚度大大减小。正向电压 V_F 略有增大,正向电流 I_F 将大大增加,呈现为小电阻特性。

V_F 大于门坎电压以后曲线很陡,可以认为有一固定压降(正向导通压降),硅管为 0.6~0.7V。

反向特性:P 型及 N 型半导体中少子漂移形成反向饱和电流。硅管在几微安以下。

反向击穿特性:反向电压超过一定数值,二极管反向击穿。

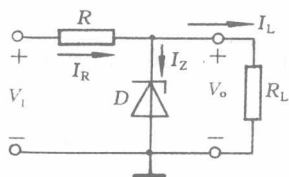


图 1-2 齐纳二极管稳压电路

2. 齐纳二极管, 简称稳压管。齐纳二极管的反向击穿特性很陡。反向击穿电压 V_Z 即为稳压管的稳定电压。

稳压电路如图 1-2 所示, 图中限流电阻 R 的计算为

$$R_{\max} = \frac{V_{I\min} - V_Z}{I_{L\max} + I_{Z\min}}$$

$$R_{\min} = \frac{V_{I\max} - V_Z}{I_{L\min} + I_{Z\max}}$$

$$R_{\max} \geq R \geq R_{\min}$$

式中 V_Z ——稳压管稳定电压;
 I_Z ——稳压管稳定电流;
 V_I ——稳压电路输入电压;
 I_L ——负载电流。

1.1.3 二极管基本电路的分析方法

二极管是一种非线性器件, 二极管电路的分析要采用非线性电路的分析方法。一般采用模型电路分析法, 简化计算。

1. 二极管 $V-I$ 特性的建模

(1) 理想模型

如图 1-3 所示。加正向电压时: $v_D = 0$, 看成短路。加反向电压时: $i_D = 0$, 看成开路。当工作电压大于二极管正向电压 $v_D (0.7V)$ 时适用。

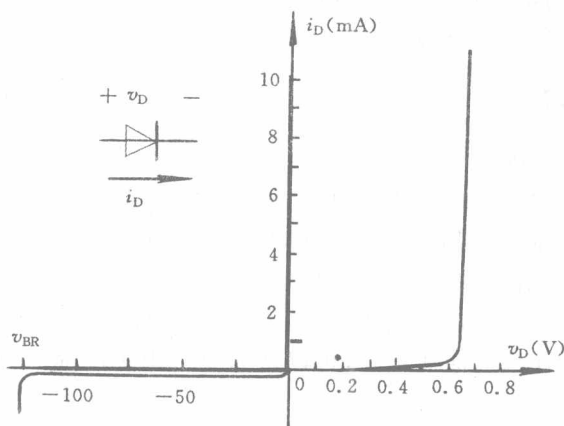


图 1-3 二极管理想模型及其伏安特性

(2) 恒压降模型

理想二极管符号加电压源 V_D , 如图 1-4 所示。加正向电压导通后, 其压降看作恒定。硅管的正向压降 V_D 为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$; 锗管为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

当 $i_D < 1\text{mA}$ 时, 二极管工作于特性曲线的弯曲部分。模型的计算结果与实际情况相差较大。所以, 一般在 $i_D \geq 1\text{mA}$ 时才适用。

(3) 折线模型

理想二极管符号加电压源 V_{th} 和电阻 r_D 。 V_{th} 为门坎电压 0.5V 。如图 1-5 所示。
 $r_D = (0.7\text{V} - 0.5\text{V}) / 1\text{mA} = 200\Omega$ 。注意, 不同管子的 V_{th} 和 r_D 数值离散性较大。若 $i_D > 1\text{mA}$, 代入模型计算二极管正向压降, 会发现其数值偏大, 与实际情况不符。故适用于 $i_D \leq 1\text{mA}$ 。

(4) 指数模型

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

微机辅助分析时较为适用。

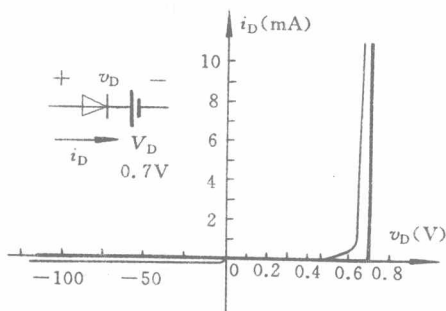


图 1-4 二极管恒压降模型及其伏安特性

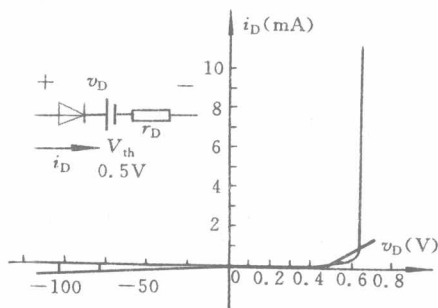


图 1-5 二极管折线模型及其伏安特性

在手工计算二极管电路时, 最常用的是恒压降模型。

2. 开关电路中二极管通断的分析

开关电路中判断二极管通断的分析可按下述步骤来做, 可先将二极管断开, 然后根据电路计算二极管阳、阴极间的电位差, 若阳极电位高于阴极电位 0.5V (硅管) 以上, 则二极管导通, 否则二极管截止。

1.2 基本要求

1. 本章应重点掌握 PN 结及单向导电性、二极管伏安特性和二极管主要参数。
2. 掌握二极管的理想模型、恒压降模型、二极管折线模型。根据不同的二极管电路, 会利用相应的二极管模型对电路作分析计算。

3. 掌握稳压二极管工作原理、特性以及电路计算。
4. 了解半导体原子结构、杂质半导体、PN 结形成。

1.3 典型例题

例 1-1 二极管电路如图 1-6 所示, 计算图中二极管的电压、电流值。

解 采用二极管的等效模型, 对二极管的电压、电流进行分析。

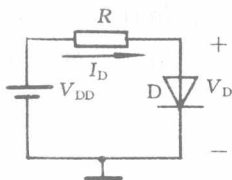


图 1-6 二极管电路

按照二极管的等效模型画出相应的等效电路, 进行计算, 三种模型可画出三种不同的电路, 如图 1-7—图 1-9 所示。

(1) 设 $V_{DD} = 10\text{V}$, $R = 10\text{k}\Omega$

① 理想模型: $V_D = 0\text{V}$ $I_D = \frac{V_{DD}}{R} = 1\text{mA}$

② 恒压降模型: $I_D = \frac{(V_{DD} - V_D)}{R} = 0.93\text{mA}$

$$V_D = 0.7\text{V}$$

③ 折线模型: $I_D = \frac{(V_{DD} - V_{th})}{(R + r_D)} = 0.931\text{mA}$

$$V_D = V_{th} + I_D r_D = 0.69\text{V}$$

V_{DD} 较大时, 不同模型计算的二极管电流值差异较小。

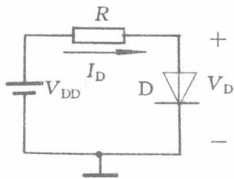


图 1-7 理想模型等效电路

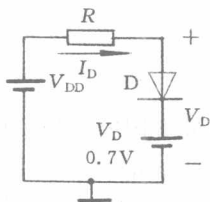


图 1-8 恒压降模型等效电路

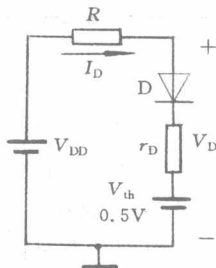


图 1-9 折线模型等效电路

(2) 设 $V_{DD} = 1\text{V}$, $R = 10\text{k}\Omega$

① 理想模型 $I_D = 0.1\text{mA}$

② 恒压降模型 $I_D = 0.03\text{mA}$

③ 折线模型 $I_D = 0.049\text{mA}$

$$V_D = 0.51\text{V}$$

V_{DD} 较小时, 计算所得二极管电流值差异很大。折线模型的计算结果比较符合

实际情况。由此可见,不同的场合,应采用不同的模型进行计算,使所得的结果能符合工程的实际情况,又可减小计算的工作量。

例 1-2 二极管限幅电路如图 1-10 所示,参考电压 $V_{\text{REF}} = 3\text{V}$, 输入电压 v_i 为正弦波,其幅值大于 6V ,画出输出波形。

解 首先作传输特性: v_i-v_o 关系。

(1) 采用折线模型分析,等效电路如图 1-11 所示。

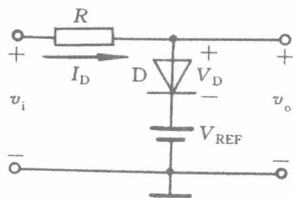


图 1-10 二极管限幅电路

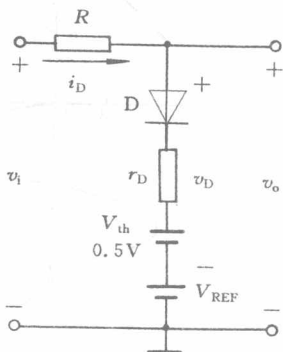


图 1-11 折线模型等效电路

$v_i \leq (V_{\text{REF}} + V_{\text{th}})$ 理想二极管反向截止。

R 上无电流,所以无压降。由此可得 $v_o = v_i$, 传输特性曲线斜率为 1 并通过 0 点。

$v_i > (V_{\text{REF}} + V_{\text{th}})$ 理想二极管导通,

$$v_o = (V_{\text{REF}} + V_{\text{th}}) + [v_i - (V_{\text{REF}} + V_{\text{th}})] r_D / (R + r_D)$$

传输特性转折以斜率为 $r_D / (R + r_D)$ 上升。曲线在 $v_i = (V_{\text{REF}} + V_{\text{th}})$ 处转折。由此可给出 v_o 波形,如图 1-13 所示。

(2) 采用恒压降模型分析,如图 1-12 所示。

$$v_i < (V_{\text{REF}} + V_D) : v_o = v_i$$

$$v_i \geq (V_{\text{REF}} + V_D) : v_o = (V_{\text{REF}} + V_D)$$

亦可画出传输特性和 v_o 波形,如图 1-14 所示。

两种波形的 v_o 不同,前者圆头,较为正确,后者为平头,与示波器观察波形相差较大。

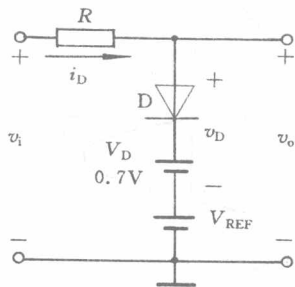


图 1-12 恒压降模型等效电路

例 1-3 二极管电路如图 1-15 所示,试判别图中二极管是导通还是截止,并计算 AO 间的电压大小。

解 对图中两个二极管,假设先将 D_2 断开,观察 D_1 , D_1 承受正向电压导通, AO 间电压近似为零。此时连接 D_2 , D_2 要承受 6V 的正向电压,使其导通。 D_2 导通后,

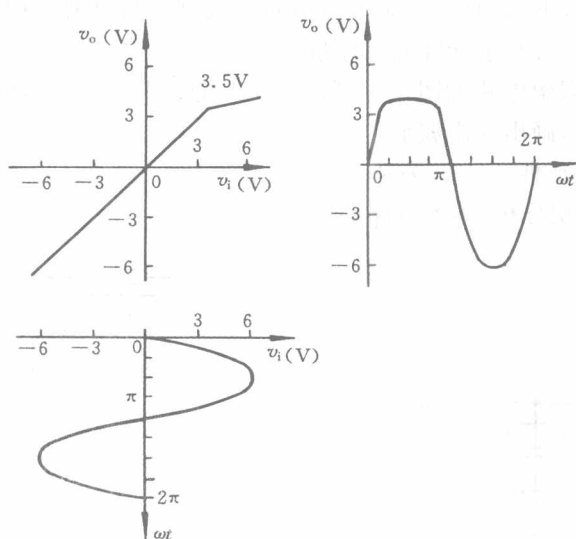


图 1-13 折线模型等效电路的波形图

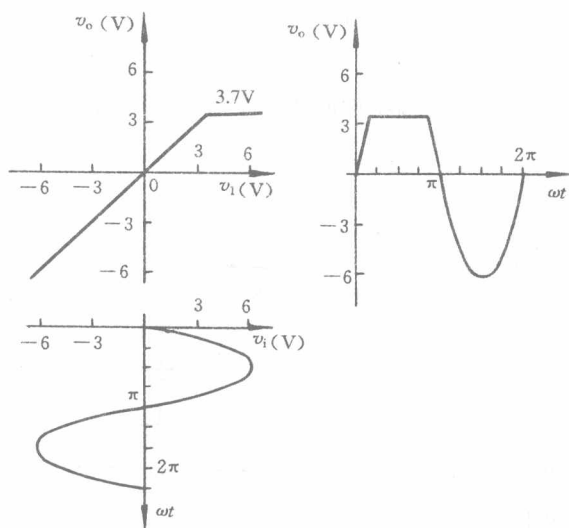


图 1-14 恒压降模型等效电路的波形图

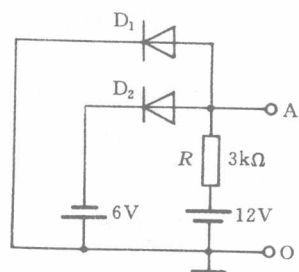


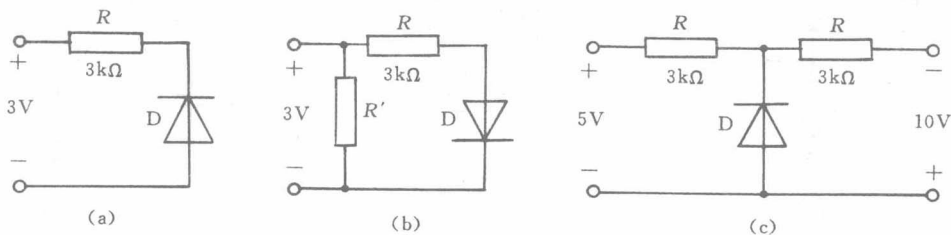
图 1-15 二极管电路

AO 间电压近似为 $-6V$, 使 D_1 承受反向电压截止。由此可见, 图中两个二极管是 D_2 导通、 D_1 截止。AO 间电压为 $-6V$ 。

1.4 习题及答案

习 题

1. 半导体中的少数载流子浓度是随着_____的增加而增加的,多数载流子浓度是随着_____的增加而增加的。(温度、杂质浓度、电子、空穴。)
2. P型半导体中多子是____,少子是____;N型半导体中多子是____,少子是____。(电子、空穴。)
3. PN结外加正向电压,呈现电流____,等效电阻____,此时为____状态;PN结外加反向电压,呈现电流____,等效电阻____,此时为____状态。(大、小、导通、截止。)
4. 二极管的正向电流在10mA的基础上增加一倍,它两端的压降将_____。(基本不变、也增加一倍、增加一倍以上。)
5. 二极管的正向压降在0.6V的基础上增加1%,它的电流_____。(基本不变、也增加1%、增加1%以上。)
6. 试判别题图1-6中各二极管是导通还是截止。



题图 1-6

7. 电路如题图1-7所示,试判别图中二极管是导通还是截止,并计算AO间的电压大小。
8. 电路如题图1-8所示,试判别图中二极管是导通还是截止。
9. 二极管限幅电路如题图1-9所示,输入电压 v_i 为正弦波,其幅值大于6V,画出输出波形。
10. 电路如题图1-10所示,试判别图中二极管是导通还是截止,并计算电位V的数值。
11. 电路如题图1-11所示,图中 $v_{i1} = 0V$ 、 $v_{i2} = 3V$ 。试判别图中二极管是导通还是截止,并计算输出电压 v_o 的数值。
12. 二极管限幅电路如题图1-12所示,设图中二极管是理想元件。输入电压 v_i 从0V到15V,要求画出电路的传输特性。
13. 电路如题图1-13所示,设二极管是理想的。
 - (1) 画出电路的传输特性;
 - (2) 若输入电压 $v_i = 20\sin\omega t$,画出输出电压波形。
14. 稳压管电路如题图1-14所示,稳压管的稳定电压 $V_Z = 7V$,正向导通压降 $V_D = 0.7V$,问电路的输出电压为多少?