

模拟电子技术学习指导

浙江大学电子学教研室 编

浙 江 大 学 出 版 社

1988 年 · 杭州

内 容 简 介

本书是与《模拟电子技术基本教程》(高教版,浙大电子学教研室编,邓汉馨主编)配套的教学参考书。

全书共分八章。前七章内容包括:《教程》中各章基本教学要求和参考学时;各章内容综述;解题方法指导;补充习题及习题参考答案。第八章提供了前修课程基本概念测试、期中测验和期末考试三种自测试卷。

本书可作为高校学习《模拟电子技术基本教程》一书的教学辅导材料,也可作为本科、大专、电大“模拟电子技术基础”课程的教学参考书。

责任编辑:尤建忠

模拟电子技术学习指导

浙江大学电子学教研室编

* * *

浙江大学出版社出版

上虞汤浦印刷厂排版

萧山东湘印刷厂印装

浙江省新华书店发行

* * *

开本 850×1168 1/32 印张 9.5 字数 230千

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数 1-5000

ISBN 7-308-00092-3

TN·012 定价:2.25元

前 言

本书是与浙江大学电子学教研室编写的《模拟电子技术基本教程》一书(高等教育出版社1986年版,以下简称《教程》)配套的教学参考书。

全书共分八章。前七章与《教程》一书的章名一一对应,内容包括:各章基本教学要求和参考学时;各章内容综述;解题方法指导;补充习题及《教程》中各章习题的参考答案。第八章向读者提供了“前修课程”基本概念测试、期中测试和期末考试三种自测试卷。

编写本书的目的在于帮助读者在有限的学时内,更好地掌握“模拟电子技术”的基本概念和基本分析方法。为此,本书各章的“综述”部分用分析、归纳、列表比较等方式进行扼要的总结,对重点难点作较详细的阐述。书中用较大篇幅通过各种类型的例题作解题方法指导,以弥补由于学时紧、课堂上举例少的不足,并精选一定数量的基本题和少量较难的综合题、读图练习题和设计性习题,供不同程度的学生课外复习之用。我们希望读者通过阅读本书和解题练习,较好地理解本课程的主要内容及其相互

之间的联系，使所学知识融会贯通，并扩展思路，以便有效地培养分析和解决问题的能力。

本书是根据本教研室许多教师长期来的教学实践经验编写而成的。曹琴华编写第一至四章，于胜其编写第五至七章，郑家龙编写第八章并参与了书稿的多次修改工作。

姚玉明同志在审阅本书的过程中提出了宝贵的意见。模拟电子技术教学小组的全体同志参加了书稿的讨论和初稿的试用。我们在此谨致以衷心的感谢！

限于水平，书中难免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编者

1988年1月于浙大

目 录

第一章 半导体二极管及其电路的分析方法

一、基本教学要求和参考学时	1
二、本章内容综述	1
三、习题提示和解题方法指导	7
四、补充习题及习题参考答案	18

第二章 半导体三极管及其基本放大电路

一、基本教学要求和参考学时	29
二、本章内容综述	30
三、习题提示和解题方法指导	46
四、补充习题及习题参考答案	61

第三章 多级放大电路

一、基本教学要求和参考学时	73
二、本章内容综述	74
三、解题方法指导	85
四、补充习题及习题参考答案	100

第四章 放大电路的频响分析

一、基本教学要求和参考学时	105
二、本章内容综述	106
三、解题方法指导	115
四、补充习题及习题参考答案	129

第五章 反馈在放大电路中的应用

一、基本教学要求和参考学时	132
---------------	-----

二、本章内容综述	133
三、解题方法指导	153
四、补充习题及习题参考答案	171
第六章 波形发生与变换电路	
一、基本教学要求和参考学时	181
二、本章内容综述	182
三、解题方法指导	191
四、补充习题及习题参考答案	206
第七章 功率电路	
一、基本教学要求和参考学时	214
二、本章内容综述	215
三、解题方法指导	236
四、补充习题及习题参考答案	250
第八章 自我测试题	
一、前修课程基本概念自测试卷	260
二、期中测验自测试卷	270
三、期末考试自测试卷	275
四、试卷参考答案	282
主要参考文献	

第一章 半导体二极管及其 电路的分析方法

本章内容是学习电子电路的必备基础知识。在学习半导体器件时,读者应主要着眼于它在电路中的正确使用。了解器件内部的物理过程,也是为了更好地使用器件。二极管、稳压管的主要特性和参数及其电路的分析计算方法是本章的学习重点。

一、基本教学要求和参考学时

1. 基本教学要求

- 1) 一般了解半导体的导电特点、PN 结的形成和特性, 以及二极管、稳压管的工作机理。
- 2) 掌握二极管与稳压管的伏安特性、主要参数和使用要点。
- 3) 学会二极管及稳压管电路的分析方法——图解分析法及模型分析法。

2. 本章参考学时

节号	节题	参考学时
§1.1	半导体器件工作机理的基础	1.5
§1.2	整流二极管和稳压二极管	1.5
§1.3	半导体二极管电路的分析方法	2.5
§1.4	半导体二极管中的电容效应及其影响	0.5
合计		6

二、本章内容综述

1. 半导体的基础知识

(1) 半导体的导电方式

两种载流子(自由电子和空穴)的运动。

(2) 本征半导体

导电率低,不能直接用作半导体器件的材料。温度对“电子-空穴对”的浓度影响很大。

(3) 掺杂半导体

导电率明显增加。导电率的大小取决于掺杂浓度。掺杂半导体是制造半导体器件的基本材料。

两种杂质半导体:N型(电子为多子)和P型(空穴为多子)。注意,它们仍呈电中性。

两种浓度不同的载流子:多子(主要取决于掺杂浓度)和少子(由热激发等形成,因而与温度关系密切,是不稳定因素)。

(4) PN 结

1) 结的形成

PN 结两侧的多子浓度不同→多子扩散→产生空间电荷层和内建电场→少子漂移→交界面附近形成稳定的空间电荷层(或称耗尽层、势垒区)。此时,扩散与漂移达到动态平衡。

2) 单向导电原理

加正偏(P区 $\oplus$,N区 $\ominus$):削弱内建电场,扩散大于漂移,允许正向电流通过。(此电流主要由多子引起,其大小取决于外电路的参数)

加反偏(N区 $\oplus$,P区 $\ominus$):增强内建电场,漂移大于扩散,反向电流很小。(此电流主要由少子引起,在一定电压范围内,其大小几乎不变)

3) PN 结的伏安特性

反映伏安特性 $I = I_s(e^{U/U_T} - 1)$ 的曲线如图 1.2.1 所示(室温下, $U_T \approx 26\text{mV}$)。

正偏时,若 $U \gg U_T$,则 $I \approx I_s e^{U/U_T}$ 。

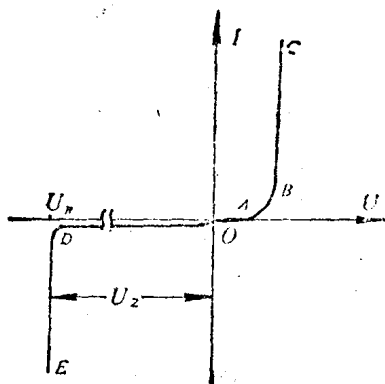


图 1.2.1

反偏时,若 $|U| \gg U_r$, 则 $I \approx -I_s$ 。

4) PN 结的反向击穿特性

反向电压(绝对值)大于击穿电压 $|U_B|$ 时, 反向电流剧增, PN 结击穿, 如图 1.2.1 中 DE 段所示。有两种击穿机理: 齐纳击穿和雪崩击穿。

5) 温度对伏安特性的影响

正向: 电压温度系数为 $\frac{\partial U}{\partial T} = -(2 \sim 2.5) \text{ mV/}^\circ\text{C}$ (负温度系数)。

数)。

反向: 温度每增加 10 度, 反向电流 I_s 约增加一倍, 即

$$I_s(T) = I_s(T_1) 2^{\frac{(T-T_1)}{10}}$$

击穿时 $\begin{cases} \text{齐纳击穿: } T \uparrow \rightarrow U_z \downarrow (\text{负温度系数}) \\ \text{雪崩击穿: } T \uparrow \rightarrow U_z \uparrow (\text{正温度系数}) \end{cases}$

6) PN 结的电容效应

工作频率很高时, 结电容将影响 PN 结的单向导电特性。

势垒电容 C_B —— 等效于结区内空间电荷层的变化。主要在

PN 结反偏时考虑。

扩散电容 C_D —— 等效于结区外多子扩散过程中的电荷积累效应。主要在 PN 结正偏时考虑。

2. 二极管和稳压管的特性和参数

(1) 二极管和稳压管的结构

从结构上看,它们都由一个 PN 结构成,因而有许多相同的特性,但它们对 PN 结特性的利用角度不同。整流二极管主要利用 PN 结的单向导电特性(图 1.2.1 中的 OC 和 OD 段);稳压二极管主要利用 PN 结的反向击穿特性(图 1.2.1 中的 DE 段)。

(2) 二极管、稳压管伏安特性的特征

其形状与 PN 结伏安特性相似,如图 1.2.2 所示。

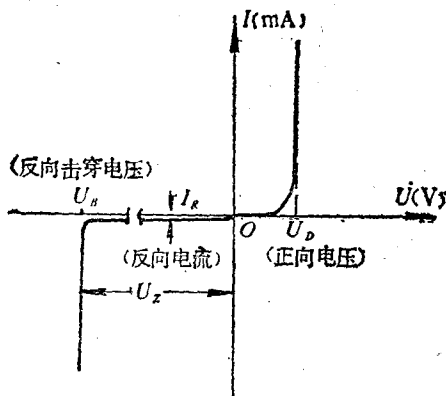


图 1.2.2

正向特性 当 I 较小(如 1mA 以下), 且 $U \gg U_T (26\text{mV})$ 时, 伏安特性呈指数特性, 即 $I \approx I_s e^{U/U_T}$; 当 I 较大时, 随着 U 的增加, I 迅速增大。此时, 伏安特性呈恒压特性(硅管 $U_D \approx 0.7\text{V}$, 锗管 $U_D \approx 0.2\text{V}$)。

反向特性 $|U| < U_Z$ 时, 反向电流几乎与电压 U 无关, 呈现恒流特性, 且 I_R 很小(如硅管 I_R 为微安级); 当出现反向击穿时,

又呈现恒压特性, $|U| \approx U_Z$ 。

(3) 主要参数

半导体器件的参数反映了器件在各方面的电性能, 是合理选择和正确使用的依据。

1) 二极管的主要参数

极限参数 最大整流电流 (I_{FM}) 和最高反向工作电压 (U_{RM})。

直流参数 正向压降 (U_D) (在一定正向电流下) 和反向漏电流 (I_R) (在一定反向电压下)。

交流参数 结电容和最高工作频率。

2) 稳压二极管的主要参数

极限参数 最大耗散功率 (P_{ZM}) 或最大稳定电流 (I_{ZM})。

直流参数 稳定电压 (U_Z) (在一定稳定电流下) 和稳定电压的温度系数 ($\Delta U_Z / \Delta T$)。

交流参数 动态电阻 (r_Z)。

外电路的参数要保证器件安全、可靠地运行在它的额定参数范围内, 不能超过其极限参数。

3. 半导体二极管电路的分析方法

(1) 模型分析法

模型分析法的实质是对半导体器件的伏安特性曲线进行线性化处理, 然后应用线性电路定律分析其工作情况。必须注意, 不同的工作条件往往对应着绝然不同的电路模型。

根据伏安特性曲线中的不同工作区域, 可以用不同的模型取代电路中的二极管, 如图 1.2.3 所示。

正向区模型 OA 段: $I \approx 0$, 常称为“死区”, 在近似计算中可以用开关“打开”的模型来模拟。 BC 段: $U_D \approx \text{const}$, 在静态计算时常用一恒压源模型来模拟 (对硅管, $U_D \approx 0.7V$; 对锗管, $U_D \approx 0.2V$)。

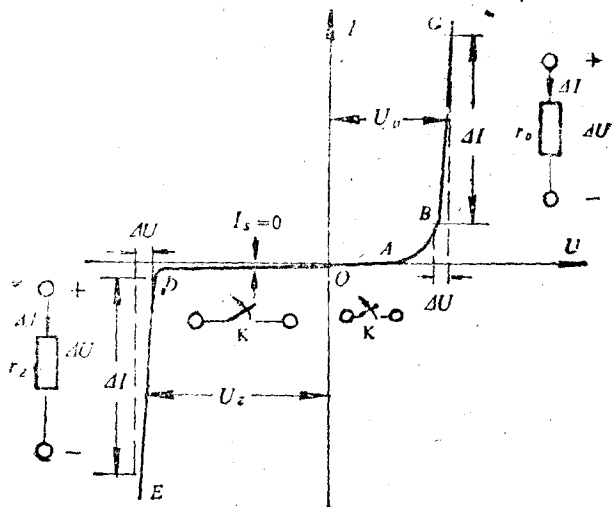


图 1.2.3

反向区模型 OD 段: $I_R \approx 0$, 与 OA 段的模拟方法相同。
 DE 段: $U_z \approx \text{const}$, 与 BC 段的模拟方法相同。

还必须指出, 线性化模型的建立是为一定的分析目的服务的。不同的分析目的和不同的工作区域决定了不同的电路模型。

1) 大信号模型

如果二极管的工作范围很大, 如工作在图 1.2.3 中的 DOC 区域(称为大信号工作状态), 而分析的目的仅仅是为了粗略地估计二极管电路中电压、电流的大小及波形情况, 则可突出其单向导电性, 忽略其次要因素, 把二极管视作理想开关。此时, 其正向特性可近似地看作与纵坐标重合(即认为 $U_D \approx 0$), 反向特性与横坐标重合(即 $I_R \approx 0$), 如图 1.2.4 所示。图中的击穿区不允许使用, 以

虚线表示。

2) 小信号模型

如果二极管工作的范围很小,如仅仅工作在图 1.2.3 中 DE 段 (或 BC 段) 中的一个小范围内,而分析的目的是为了计算二极管在该范围内的电压或电流的变化 ΔU 或 ΔI , 则二极管可用一动态电阻 r_z (或 r_D) 来模拟 (r_z (或 r_D) = $\Delta U / \Delta I$), 即对小信号

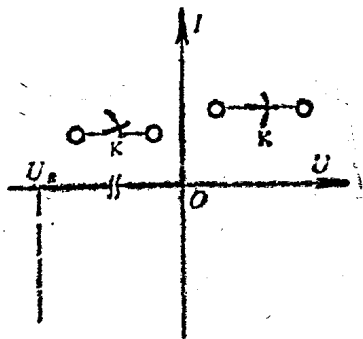


图 1.2.4

来说,必须考虑 DE 段 (或 BC 段) 特性曲线的斜率。

可见,使用模型分析法时,必须首先依据器件的工作区域和电路分析计算的目的来决定选择什么样的模型,这一点是正确使用模型分析法的关键所在。

(2) 图解分析法

图解法是一种利用器件的伏安特性曲线 (非线性的) 和外电路方程所确定的伏安特性曲线 (多数是线性的), 求解器件工作电流和工作电压的方法。

它的优点是形象直观,可以对器件的工作区域一目了然,但使用不方便 (特别是对复杂电路), 且误差较大。

三、习题提示和解题方法指导

1. 本章教材部分习题的提示

习题 1.3 PN 结的结温是有一定限制的 (硅管约 150°C , 锗管约 75°C)。当 PN 结通过的电流较大时, 结温就升高。若超过其限值, 就可能烧环 PN 结。所以无论工作在正向特性区还是工作在反向击穿区, 外电路一定要串联适当的电阻, 以限制通过管子的电流。

习题 1.4 本题是图解法的应用练习。万用表置于不同的电阻档量程时其内阻不同,相当于外电路的负载线斜率不同。它们与二极管伏安特性曲线相交于不同的工作点上,这相应于管子有不同的直流电阻 $R_D = U/I$ 。不同量程下测出的正向电阻值相差甚大,这正说明了二极管特性的非线性。

习题 1.5 先把除管子以外的电路用戴维南定理化简成单回路,然后再用图解法解题。

习题 1.8 判别二极管导通还是截止,主要看管子两端的电位差。可以暂将管子从电路中移开,然后按管外电路的开路电位极性和大小来判别管子导通还是截止。当电路中包含多只二极管时,如两只管子的正端(或负端)相连,则正向电位差大的那只管子优先导通,然后再决定其它管子是否导通;当不同材料的管子并联时,则死区电压较小的管子优先导通。

习题 1.10 注意,当两只稳压管并联时,稳压值低的一只首先击穿,且其上的电压稳定在这个稳压值上。此时,另一只稳压值较高的稳压管便不可能工作在击穿区了。

2. 解题方法指导

主要通过例题说明。

例 1.1 图 1.3.1 (a)、(b) 电路中 $u_i = 12\sin\omega t(\text{V})$ 。

1) 设 D 为理想二极管,试分别画出电压 u_O 、 u_D 和电流 i_D 的波形;

2) 计算二极管的电流平均值 I_D 及最大反向电压值 U_{RM} ;

3) 若考虑实际二极管的正向压降,则它对电路参数的计算影响如何?

解 1) 首先将二极管 D 从电路中移开,然后写出管外电路的开路电压表达式:

$$u_D = u_i - E$$

$u_D > 0$ 时,二极管导通; $u_D \leq 0$ 时,二极管截止。

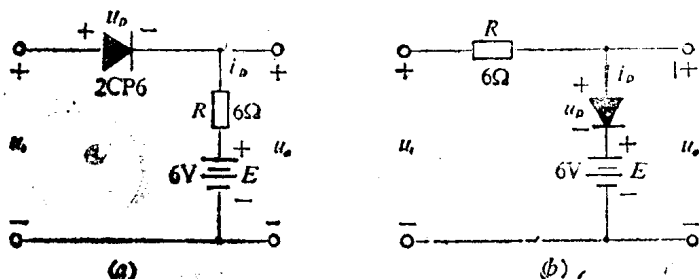


图 1.3.1

对图(a)电路, $u_i \leq E$ 时, $u_D \leq 0$, D 截止, $u_o = E$; $u_i > E$ 时, $u_D > 0$, D 导通, 所以 $u_o = u_i$ 。由此可以画出 u_o 的波形, 如图 1.3.2(a) 所示。

对图(b)电路, 分析方法相同。 u_o 波形见图 1.3.2(b) 所示。

二极管导通时, $i_D = \frac{u_i - E}{R}$, $u_D = 0$; 二极管截止时, $i_D = 0$,

$u_D = u_i - E$ 。

由图 1.3.2 可看出, 图 1.3.1(a)、(b) 两电路中, 通过二极管的电流 i_D 及其两端的电压 u_D 的波形完全相同。

2) 二极管中的平均电流为

$$I_D = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_D d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{u_i - E}{R} d(\omega t)$$

式中, $u_i = 12\sin\omega t \text{ V}$, $E = 6\text{ V}$, $R = 6\Omega$, $\theta_1 = \sin^{-1} \frac{6}{12} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$,

$$\theta_2 = \pi - \sin^{-1} \frac{6}{12} = \frac{5}{6}\pi = 150^\circ。$$

故
$$I_D = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5}{6}\pi} \frac{12\sin\omega t - 6}{6} d(\omega t) \approx 0.218 \text{ (A)}$$

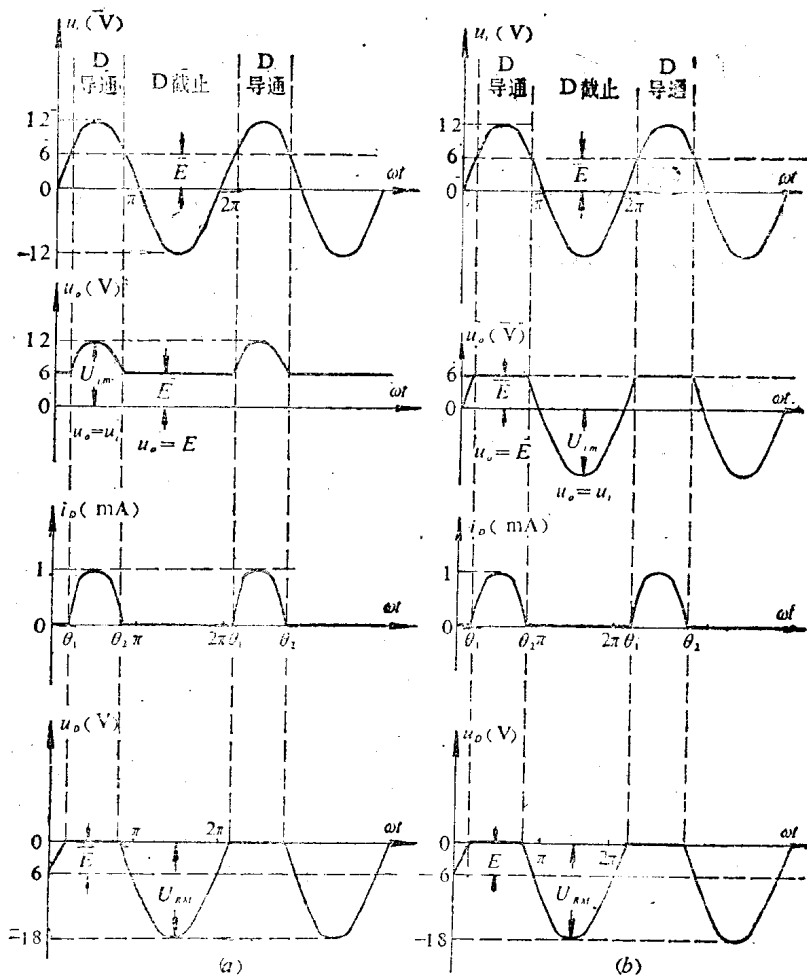


图 1.3.

二极管上可能承受的最高反向电压 U_{RM} 可由下式

$$u_D = u_i - E = 12\sin\omega t - 6$$

看出。所以

$$U_{RM} = |u_D|_{\max} = |-12 - 6| = 18V$$

可见二极管截止期间将承受最高反压，我们可以根据 I_D 和 U_{RM} 值选择合适的二极管。

3) 当考虑实际二极管的正向压降(如 2CP 型硅二极管 U_D 约为 0.7V)时,有

$$i_D = \frac{u_i - E - u_D}{R} = \frac{12\sin\omega t - 6 - 0.7}{6}$$

$$= 2\sin\omega t - 1.11(\text{A})$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{6 + 0.7}{12} \approx 34^\circ$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \theta_1 = 180^\circ - 34^\circ = 146^\circ$$

与忽略实际二极管的正向压降时相比, i_D 的最大值 $i_{D\max}$ 和 θ_1, θ_2 值的相对误差均在 15% 以内, 且 U_{im} 和 E 值愈大于 U_D 时, 上述误差愈小。在工程上, $\pm 10\%$ 以内的误差是允许的。因此, 能否采用近似的方法计算还应考虑路的实际参数条件。

例 1.2 简单稳压电路及稳压管特性如图 1.3.3 (a) 和 (b) 所示。若要求稳压管工作电流范围为 $4 \sim 10\text{mA}$, 试确定限流电阻 R 和最小负载电阻 $R_{L\min}$ 。

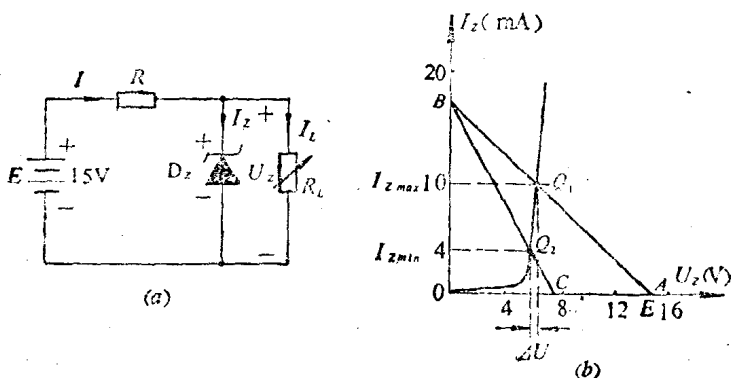


图 1.3.3