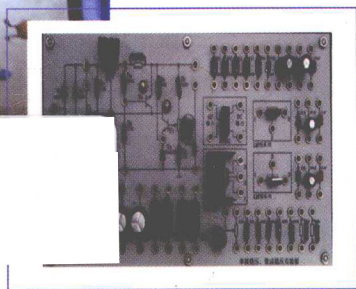
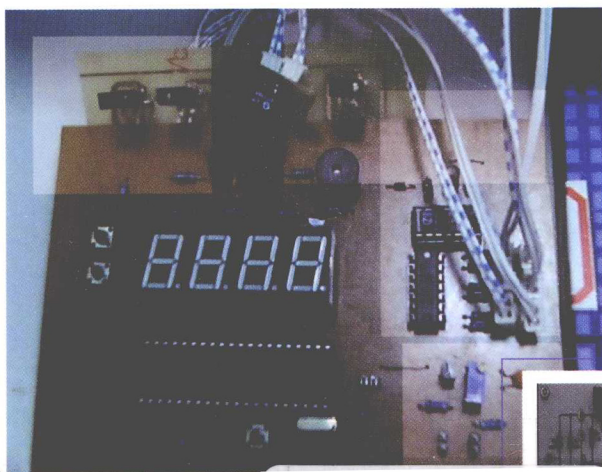


# 模拟电子技术

## 学习指导与习题解答

李秀娟 吴昭方 李良光 张宏群 主 编  
武 英 夏强胜 副主编



- ◎ 旨在让学生学会分析问题与解决问题的方法，提高学习效率。
- ◎ 列明“教学基本要求”，便于学生规划学习进度；总结“基本概念”，便于学生课后复习。
- ◎ 给出重难点分析、学习方法指导和典型例题分析，便于学生把握重点，突破难点，做到举一反三。



清华大学出版社

# 模拟电子技术学习指导与习题解答

李良光 张宏群 主 编  
李秀娟 吴昭方 副主编  
武 英 夏强胜

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是为配合郭业才教授、黄友锐教授主编的《模拟电子技术》(清华大学出版社, 2011年)教材而编写的教学辅导资料, 其主要内容包括二极管及其电路、半导体三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的反馈、信号运算与处理电路、信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电源、电子电路识图和模拟电子线路的 Multisim 仿真等。每章有六部分内容, 即教学要求、基本概念、重点难点分析、学习方法指导、典型例题分析和习题详解。

本书可作为高等学校电子信息与电气学科各专业的课程教学参考书, 也可作为自学和考研学生的复习资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。  
版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术学习指导与习题解答/李良光, 张宏群主编; 李秀娟, 吴昭方, 武英, 夏强胜副主编. --北京: 清华大学出版社, 2011.4

ISBN 978-7-302-25067-8

I. ①模… II. ①李… ②张… ③李… ④吴… ⑤武… ⑥夏… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038324 号

责任编辑: 李春明 郑期彤

装帧设计: 杨玉兰

责任校对: 周剑云

责任印制: 王秀菊

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 15.5 字 数: 371 千字

版 次: 2011 年 4 月第 1 版 印 次: 2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 28.00 元

---

产品编号: 039266-01

# 前 言

“模拟电子技术”课程是高等学校电类各专业的重要专业基础课程。由于本课程涉及的基本概念多，工程应用方面的分析与计算灵活多变，初学者不易适应，故学生普遍感觉到该课程难学。我们编写该书的目的是为了让学生的学习本门课程时能够抓住要点、搞清难点，学会分析问题与解决问题的方式方法，提高学习效率。

本书为郭业才教授、黄友锐教授主编的《模拟电子技术》(清华大学出版社，2011年)一书的配套辅导资料，全书的编写顺序与教材一致。每章内容的安排顺序为：首先，给出本章的基本教学要求，让学生大致了解教学内容及目标；其次，精炼了本章重要的基本概念，便于学生课后复习；接下来，给出了重点难点分析、学习方法指导和典型例题分析，便于学生把握重点，突破难点，做到举一反三；最后，给出了全部习题的详细解答。

本书由安徽理工大学、南京信息工程大学、安庆师范学院和南京晓庄学院的老师共同编写。全书共12章，第1章和第6章由郭业才教授编写；第2章由武英副教授编写；第3章由吴昭方副教授和夏强胜讲师合作编写；第4章由李秀娟副教授编写；第5章与第11章由李良光副教授编写；第7章由张宏群副教授编写；第8章由赵静讲师编写；第9章由金彩虹副教授编写；第10章由吴昭方副教授和王陈宁讲师合作编写；第12章由黄友锐教授编写。李良光和张宏群两位主编对全书进行了统稿与定稿。

本书的出版得到了安徽省省级精品课程《模拟电子技术》建设基金和南京信息工程大学教材建设基金、精品课程《模拟电子线路》建设基金的支持，同时，清华大学出版社给予了很大的帮助，在此表示感谢！

由于时间仓促及编者水平有限，书中难免有不妥或者错误之处，敬请广大读者批评指正。

编 著

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	4.5 典型例题分析	67
1.1 教学要求 .....	1	4.6 习题详解	72
1.2 基本概念 .....	1	<b>第 5 章 集成运算放大电路</b> .....	82
1.3 学习方法指导 .....	2	5.1 教学要求	82
<b>第 2 章 二极管及其电路</b> .....	3	5.2 基本概念	82
2.1 教学要求 .....	3	5.3 重点难点分析	84
2.2 基本概念 .....	3	5.4 学习方法指导	84
2.3 重点难点分析 .....	6	5.5 典型例题分析	85
2.4 学习方法指导 .....	8	5.6 习题详解	85
2.5 典型例题分析 .....	9	<b>第 6 章 放大电路中的反馈</b> .....	91
2.6 习题详解 .....	12	6.1 教学要求	91
<b>第 3 章 半导体三极管及其放大电路</b> .....	20	6.2 基本概念	91
3.1 教学要求 .....	20	6.3 重点难点分析	93
3.2 基本概念 .....	20	6.4 学习方法指导	100
3.3 重点难点分析 .....	22	6.5 典型例题分析	101
3.3.1 三极管 .....	22	6.6 习题详解	108
3.3.2 静态分析 .....	24	<b>第 7 章 信号运算与处理电路</b> .....	119
3.3.3 动态分析 .....	24	7.1 教学要求	119
3.3.4 共基、共集电路分析	25	7.2 基本概念	119
3.3.5 差分放大电路	28	7.2.1 基本运算电路	119
3.3.6 频率响应 .....	31	7.2.2 有源滤波电路	124
3.4 学习方法指导 .....	36	7.3 重点难点分析	127
3.5 典型例题分析 .....	37	7.3.1 运放线性应用和非线性	
3.6 习题详解 .....	39	应用的特点	127
<b>第 4 章 场效应管及其放大电路</b> .....	61	7.3.2 集成运放在信号模拟运算中	
4.1 教学要求 .....	61	的应用	128
4.2 基本概念 .....	61	7.3.3 有源滤波电路	128
4.3 重点难点分析 .....	63	7.4 学习方法指导	128
4.4 学习方法指导 .....	66	7.5 典型例题分析	128
		7.6 习题详解	131

<b>第 8 章 信号产生电路</b> .....	141
8.1 教学要求 .....	141
8.2 基本概念 .....	141
8.3 重点难点分析 .....	144
8.4 学习方法指导 .....	151
8.5 典型例题分析 .....	151
8.6 习题详解 .....	156
<b>第 9 章 功率放大电路</b> .....	167
9.1 教学要求 .....	167
9.2 基本概念 .....	167
9.3 重点难点分析 .....	169
9.4 学习方法指导 .....	173
9.5 典型例题分析 .....	173
9.6 习题详解 .....	176
<b>第 10 章 直流稳压电源</b> .....	183
10.1 教学要求 .....	183
10.2 基本概念 .....	183
10.3 重点难点分析.....	184
10.4 学习方法指导.....	188
10.5 典型例题分析.....	188

10.6 习题详解.....	191
----------------	-----

<b>第 11 章 电子电路识图</b> .....	197
11.1 教学要求.....	197
11.2 基本概念.....	197
11.3 重点难点分析.....	197
11.4 学习方法指导.....	198
11.5 典型例题分析.....	198
11.6 习题详解.....	201

<b>第 12 章 模拟电子线路的 Multisim 仿真</b> .....	206
12.1 教学要求.....	206
12.2 基本概念.....	206
12.2.1 现实元器件和虚拟元器件 ...	206
12.2.2 虚拟仪表.....	207
12.2.3 分析工具.....	207
12.3 重点难点分析.....	207
12.4 学习方法指导.....	208
12.5 典型例题分析.....	212
12.6 习题详解.....	219

<b>参考文献</b> .....	239
-------------------	-----

# 第1章 绪 论

## 1.1 教学要求

本章是模拟电子技术课程教学的开篇，旨在让学生对这门课程的发展历程、课程内容、特点和学习方法进行了解，以唤醒学生的学习兴趣，激发学生的学习欲望。

## 1.2 基本概念

### 1. 信号及其分类

信号是携带信息的载体，可以分为模拟信号和数字信号两大类。模拟信号是指在时间和幅度上均具有连续性的信号，从宏观上看，我们周围的大多数物理量都是时间连续、数值连续的变量，如压力、温度及转速等。这些变量通过相应的传感器都可转换为模拟信号。数字信号是指幅度随时间不连续变化的、离散的信号，如电报码和用电平的高与低表示的二值逻辑信号等。

### 2. 电子线路及其分类

用于产生、传输和处理模拟信号电子电路称为模拟电路，如放大电路、滤波电路、电压/电流变换电路等，典型设备有收音机、电视机、扩音机等；用于产生、传输和处理数字信号电子电路称为数字电路，典型设备是电子计算机等。模拟电路和数字电路统称为电子线路。目前，模拟电路和数字电路的结合越来越广泛，在技术上正趋向于把模拟信号数字化，以获取更好的效果，如数码相机、数码电视机等。

### 3. 电子技术及其分类

电子技术是研究电子器件、电子电路和电子系统及其应用的科学技术，可分为模拟电子技术和数字电子技术。研究模拟电路的电子技术就是模拟电子技术，研究数字电路的电子技术就是数字电子技术。

### 4. 电子管

电子管就是一个特殊的灯泡，不过除灯丝以外，还有几个“极”，里面的灯丝与极都有连线与各自的管脚相连。最简单的电子管是二极管，它有两个极(阴极和阳极，有的灯丝还兼作阴极)，其中，阴极有发射电子的作用，阳极有接收电子的作用。二极管具有单向导电的特性，可用作整流和检波。在二极管的基础上增加一个栅极就成了电子三极管，栅极

能控制电流，栅极上很小的电流变化，都会引起阳极很大的电流变化，所以，电子三极管有放大作用。

## 5. 晶体管和集成电路

### 1) 晶体管

通俗地说，晶体管是半导体做的固体电子元件。像金、银、铜、铁等金属，它们导电性能好，叫做导体。木材、玻璃、陶瓷、云母等不易导电，叫做绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的物质，叫半导体。晶体管就是用半导体材料制成的，这类材料中最常见的便是锗和硅两种。晶体管的出现是电子技术之树上绽开的一朵绚丽多彩的奇葩。

与电子管相比，晶体管具有诸多优越性：①晶体管的构件是没有消耗的；②晶体管消耗电子极少，仅为电子管的十分之一或几十分之一；③晶体管不需预热，一开机就工作；④晶体管结实可靠，比电子管可靠 100 倍，耐冲击、耐振动。

### 2) 集成电路

集成电路是一种微型电子器件或部件。采用一定的工艺，把一个电路中所需的晶体管、二极管、电阻、电容和电感等元件及连线，制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，然后封装在一个管壳内，便成为具有所需电路功能的微型结构；其中所有元件在结构上已组成一个整体。

集成电路具有体积小、重量轻、引出线和焊接点少、寿命长、可靠性高、性能好等优点，同时成本低，便于大规模生产。它不仅在工用、民用电子设备如收录机、电视机、计算机等方面得到了广泛的应用，同时在军事、通信、遥控等方面也得到了广泛的应用。用集成电路来装配电子设备，其装配密度可比晶体管提高几十倍至几千倍，设备的稳定工作时间也可大大提高。

## 1.3 学习方法指导

第 1 章属于综述类型，是本课程的开篇。在学习本章时，主要了解电子技术的作用、功能与发展阶段及各发展阶段的特点。



# 第 2 章 二极管及其电路

## 2.1 教学要求

半导体二极管是模拟电路的基本构件之一，在学习电子电路之前，必须对它的结构、工作原理、特性及其应用有充分的了解。本章教学要求如下。

- (1) 理解半导体中两种载流子——电子和空穴的物理意义。理解 N 型和 P 型半导体的物理意义及 PN 结的形成机理。
- (2) 熟练掌握 PN 结的单向导电性，理解 PN 结的伏安特性方程的物理意义。
- (3) 掌握半导体二极管的特性及主要参数，熟练掌握半导体二极管的模型对基本应用电路的分析。
- (4) 掌握稳压管的特性及主要参数，以及稳压管构成的稳压电路。

## 2.2 基本概念

### 1. 半导体的基本知识

半导体是一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。它的导电能力与温度、光照和掺杂浓度有关。

#### 1) 本征半导体

硅(Si)和锗(Ge)是具有四个共价键结构的半导体材料，如图 2.1 所示。

纯净且具有完整晶体结构的半导体称为本征半导体。在一定的温度下，本征半导体内最重要的物理现象是本征激发(又称热激发或产生)，如图 2.2 所示。本征激发产生两种带电性质相反的载流子——自由电子和空穴。温度越高，本征激发越强。

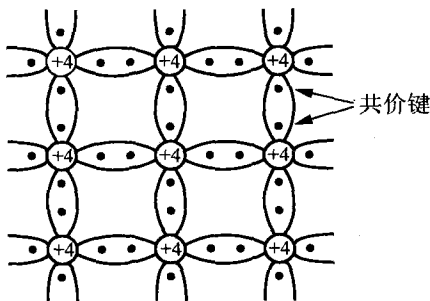


图 2.1 本征硅或锗的晶体结构

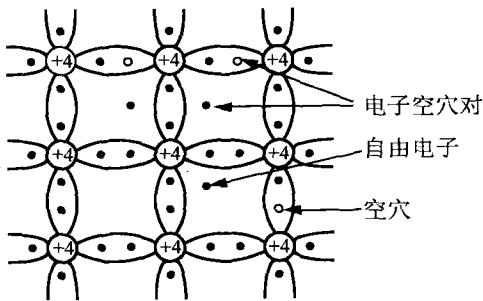


图 2.2 本征激发产生自由电子空穴对



## 2) 杂质半导体

在本征硅(或锗)中掺入微量五价(或三价)元素后形成 N 型(或 P 型)杂质半导体。N 型半导体如图 2.3 所示, P 型半导体如图 2.4 所示。

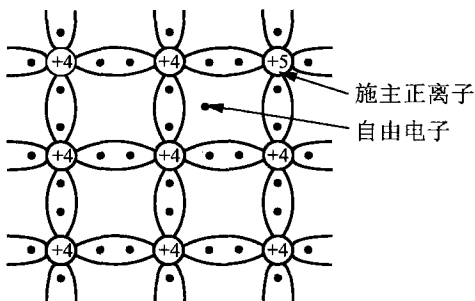


图 2.3 N 型半导体

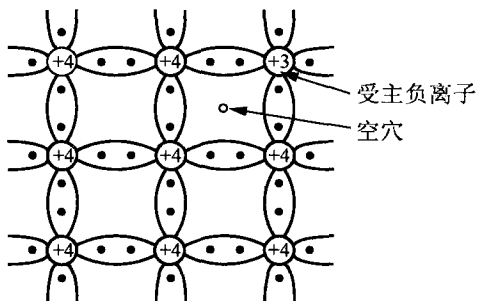


图 2.4 P 型半导体

N 型(P 型)半导体产生自由电子和杂质正离子对(空穴和杂质负离子对)。由于杂质电离, N 型半导体中的多子是自由电子, 少子是空穴; 而 P 型半导体中的多子是空穴, 少子是自由电子。在常温下, 多子 $\gg$ 少子。多子浓度和掺杂浓度有关, 几乎等于杂质浓度, 与温度无关; 而少子浓度是温度的敏感函数。杂质半导体的电导率比本征半导体高很多。

### 3) 半导体中的两种电流

半导体中存在因内电场作用产生的少数载流子漂移电流(这与金属导电一致), 以及因载流子浓度差而产生的多数载流子扩散电流。

## 2. PN 结的基本知识

### 1) PN 结

在具有完整晶格的 P 型和 N 型材料的物理界面附近, 会形成一个特殊的薄层——PN 结, 如图 2.5 所示。

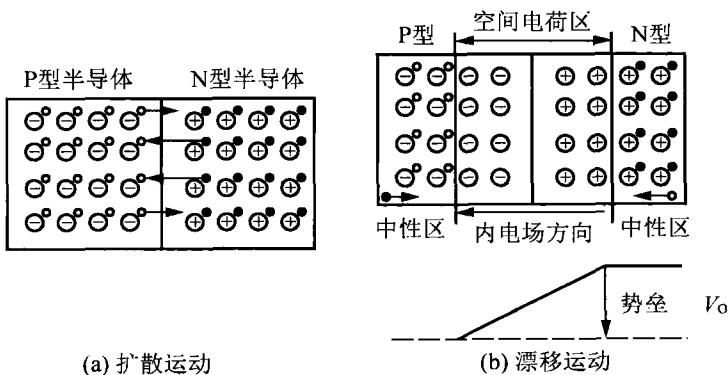


图 2.5 PN 结的形成

当浓度差引起的多子的扩散运动和内电场引起的少子的漂移运动达到动态平衡时, 就形成了 PN 结。

## 2) PN 结的单向导电性

PN 结加正向偏置时,能形成较大的正向电流,PN 结正向电阻很小;加反向偏置时,反向饱和电流很小,PN 结呈高阻这就是 PN 结的单向导电性。

## 3. 半导体二极管

普通二极管内部就是一个 PN 结,P 区引出正电极,N 区引出负电极。

### 1) 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性方程为  $i_D = I_S(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$ 。在低频下,二极管具有单向导电特性,正偏时导通;反偏时截止。 $I_S$  称为反向饱和电流。

### 2) 二极管的主要参数

二极管的主要参数有:最大整流电流;最大反向工作电压;反向电流  $I_R$  (反向饱和电流  $I_S$ );最高工作频率。

## 4. 二极管电路的分析方法

二极管是一种非线性器件,可以采用图解法和等效模型分析法。

### 1) 图解法

把电路分成两个部分,一部分是由二极管组成的非线性电路,另一部分则是由电源、电阻等线性元件组成的线性部分。分别画出非线性部分(二极管)的伏安特性曲线和线性部分的特性曲线,两条特性曲线的交点即为电路的工作电压和电流。

### 2) 等效模型分析法

二极管的等效模型有四种:理想、恒压降、折线和微变等效模型。一般情况下,理想模型和恒压降模型用得较多。

## 5. 二极管的应用

二极管广泛用于整流电路(半波整流、全波整流、桥式整流)、限幅电路(顶部限幅、底部限幅、双向限幅)、开关(嵌位)电路以及通信电路(检波器、混频器)等中。

## 6. 特殊二极管及其应用

### 1) 稳压二极管

稳压二极管(简称稳压管)具有稳压作用,其稳压特性表现在反向击穿的状态下。稳压管反向击穿后的曲线越陡,则稳压性能越好。当稳压管工作在正向偏置或反向偏置但未到击穿值时,则其状况相当于普通二极管。稳压管的符号、伏安特性及反向击穿时的模式如图 2.6 所示。

稳压管的主要参数有:  $V_Z$  —— 稳压值;  $I_{ZM}$  —— 最大稳定电流值;  $r_z$  —— 动态电阻,  $r_z = \Delta v / \Delta i$ ;  $P_Z$  —— 额定功耗,  $P_Z = V_Z \times I_{ZM}$ ;  $\alpha$  —— 温度系数。

### 2) 稳压管稳压电路

稳压二极管具有很陡的反向击穿特性,当反向电流有很大变化时,稳压管两端的电压几乎保持不变,利用该原理可设计稳压电路。稳压管的稳压功能是靠稳压管稳压特性和限流电阻的电压调节作用相互配合来实现的。

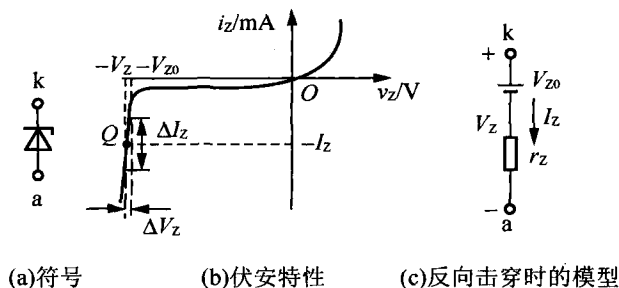


图 2.6 稳压管的符号、伏安特性及反向击穿时的模型

## 2.3 重点难点分析

(1) 本征半导体是指完全纯净的、结构完整的半导体晶体。半导体中有两种载流子参与导电(这也是其与导体区别的一个重要特征)。自由电子与空穴的电量相等,极性相反,迁移方向相反。半导体中的载流子数目越多,导电电流就可能越大。半导体的一个重要特性就是其导电性能对温度很敏感。

本征半导体的导电能力很弱(载流子浓度低),不能满足电子电路的要求。在本征半导体中掺入微量的不同价的其他元素(杂质),可大大提高载流子的浓度,从而改善导电性能。

常在硅或锗半导体中掺入五价元素(磷、锑)形成 N 型半导体。N 型半导体中:多子为电子;少子为空穴。提供电子的杂质元素称为“施主杂质”。在硅或锗半导体中掺入三价元素(硼、镓)形成 P 型半导体。P 型半导体中:多子为空穴;少子为电子。提供空穴的杂质元素称为“受主杂质”。多数载流子的浓度决定于掺杂浓度,少数载流子的浓度与温度有关。

(2) PN 结是构成各种半导体器件的基础。PN 结的形成原理是:由于掺杂不同,P、N 间存在多子浓度的差异(P 区的多子为空穴;N 区的多子为电子);浓度差引起多子的扩散运动,且其在交界处产生复合,留下由于晶格化而不能运动的正负离子(不参与导电),称为空间电荷。空间电荷区平衡时,产生的电压一般为零点几伏,又称为“接触电位差”。扩散运动继续进行,空间电荷区加宽。同时空间电荷区产生内电场(方向为正离子区指向负离子区),其作用是阻止扩散,而使少子产生漂移运动。最终达到动态平衡(这时电场力等于扩散力),空间电荷区不再加宽。空间电荷区的几种称谓包括:耗尽层、阻挡层、势垒区。从半导体的导电角度来看,非空间电荷区呈现低电阻特性,而空间电荷区则具有阻止电流的作用,呈现高阻特性。空间电荷区越宽,电阻值越大,反之亦然。

PN 结外加正向电压——正向偏置时,由于是多子导电,因而外加电压的微小变化将使电流有较大的变化。结果,扩散力大于电场力——由多子形成的扩散(正向)电流起主导地位,而少子形成的漂移电流可忽略不计,空间电荷区变窄,电阻变小。当外加负向电压——反向偏置时,电场力大于扩散力——由少子形成的漂移(反向)电流起主导地位,而多子形成的扩散电流可忽略不计,空间电荷区变宽,电阻变得很大。即 PN 结有单向导电特性(正偏导通,反偏截止)。

当 PN 结的外加电压进一步增加时,会产生反向击穿(电击穿),有齐纳击穿和雪崩击穿

两种。电击穿具有“自愈性”(可逆性)。对硅材料而言,一般来说,外加电压大于6V时的击穿为雪崩击穿,呈正温度系数;小于4V时的击穿为齐纳击穿,呈负温度系数;介于4V和6V之间时的温度系数很小。当反向电流过大,击穿的时间较长时,PN结的物理结构会因温度过高而遭到破坏,这种情况称为热击穿。热击穿具有不可逆性,使用中应避免。

PN结上同时存在势垒电容 $C_B$ 和扩散电容 $C_D$ ,正偏时 $C_D$ 起主要作用,反偏时 $C_B$ 起主要作用。低频时因 $C_D$ 、 $C_B$ 的数值很小、容抗很大,因而其作用可忽略。而高频时,其容抗较小,对电路将产生影响,使PN结的单向导电性变差。

(3) 实际的二极管伏安特性与PN结的理想伏安特性大体相同,但稍有区别,即正向偏置要经过一个门坎电压 $V_{th}$ (也称为死区电压)才能开启二极管(这是因为正向偏置首先需要克服引线电阻及体电阻的存在),如图2.7所示。在“死区”内,二极管呈现高阻,通常认为这时的二极管不导通。一般在定量计算时,仍可用PN结的伏安方程来近似描述二极管。

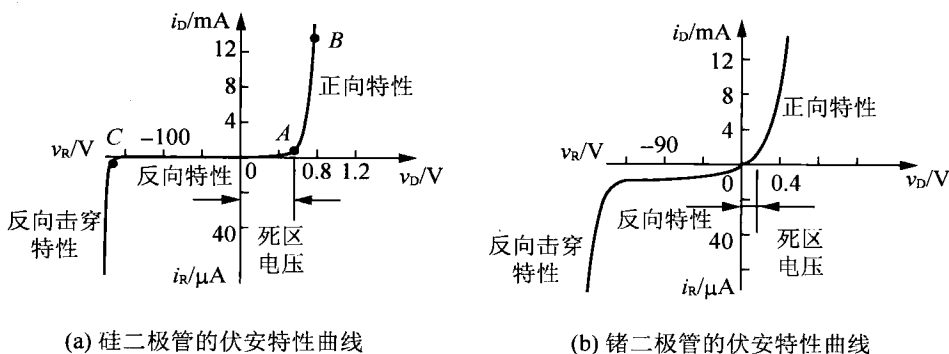
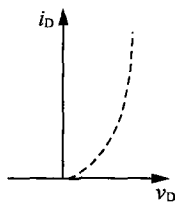


图 2.7 半导体二极管伏安特性

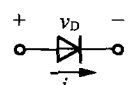
(4) 由于二极管具有单向导电性,所以在一般应用场合以及误差要求不高时,二极管在电路中的工作状态可分为“导通”或者“截止”。导通时管子呈现的电阻很小(理想情况下为零),截止时管子呈现的电阻很大(理想情况下为无穷大)。

判断二极管在电路中的工作状态的常用方法是:先假设二极管断开,然后求断开两端的电压,若端电压大于等于其导通电压(门坎电压),则管子导通,反之则截止。导通后的管压降通常取一个常值。(注意:门坎电压和管压降常值根据管子材料以及二极管等效模型的不同而不同。)

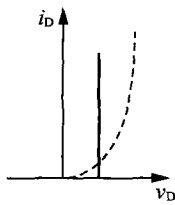
(5) 对二极管电路的分析可采用图解法和等效模型分析法。两种方法各有不同的特点,在不同的环境下应用效果也不同,使用中应根据条件合理选用,否则会影响分析。二极管的等效模型有四种,即理想模型、恒压降模型、折线模型和微变等效模型,如图2.8~图2.11所示。一般,当电源电压远大于二极管的导通压降时,就可以利用理想模型来分析。如果考虑二极管的两端电压,则恒压降模型较好,它比理想模型更接近实际情况,因此应用比较广泛。一般在二极管电流大于1mA时,恒压降模型的近似精度还是相当高的。如果二极管导通时的电压和正向电阻都不可忽略,应采用折线模型。这种模型可在信号变化较大时使用,更接近实际曲线,其近似程度比前两种模型都好。如果二极管在导通后只工作在某固定值 $Q$ 的小范围内,则可采用微变等效电路,微变等效模型只适用于小信号工作情况。一般情况下,理想模型和恒压降模型用得较多。



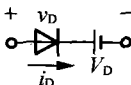
(a)伏安特性



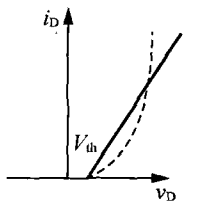
(b)代表符号



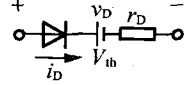
(a)伏安特性



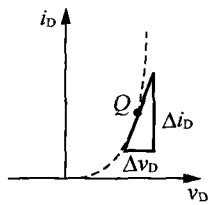
(b)代表符号



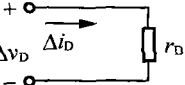
(a)伏安特性



(b)代表符号



(a)伏安特性



(b)代表符号

图 2.8 理想模型

图 2.9 恒压降模型

图 2.10 折线模型

图 2.11 微变等效模型

(6) 稳压管工作在反向击穿区时，可输出稳定的工作电压；当稳压管工作在正向偏置或反向偏置但反向电压未到击穿值时，则其状况相当于普通二极管。设计稳压管稳压电路时，要正确选取限流电阻，使稳压管在一定的负载条件下正常工作，如图 2.12 所示。

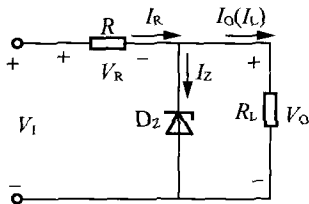


图 2.12 稳压管稳压电路图

使输出电压不稳定的因素主要有两个，一个是  $V_1$  的变化，另一个是  $R_L$  的变化。根据稳压管的伏安特性曲线， $V_O$  的微小变化将会使流过稳压管的电流发生剧烈的变化，这时即可通过限流电阻两端电压的变化来补偿输入电压或负载的变化，从而达到稳定输出电压的目的。

在工作中，当  $V_1$  和  $R_L$  变化时，为了保证稳压管正常稳压，必须保证稳压管电流  $I_Z$  在  $I_{ZMIN} \sim I_{ZM}$  的范围内。因此，必须合理选择限流电阻  $R$ 。

通过计算，限流电阻的取值范围为

$$\frac{V_{1MAX} - V_Z}{I_{0MIN} + I_{ZM}} \leq R \leq \frac{V_{1MIN} - V_Z}{I_{0MAX} + I_{ZMIN}}$$

$R$  值选得小一些，电阻上的损耗就会小一些； $R$  值选得大一些，电路的稳压性能就好一些。

## 2.4 学习方法指导

本章的重点是二极管与稳压管的伏安特性、基本电路及其分析方法。本征半导体、杂质半导体和 PN 结等相关知识是学习二极管和稳压管的基础。

在了解了半导体(本征、杂质)的基本机理后，充分掌握 PN 结是由多子的扩散运动和少

子的漂移运动两者共同形成的,是一种动态平衡。PN结具有单向导电性,二极管的工作原理主要是基于PN结的单向导电性。对于二极管电路的分析,通常采用等效模型分析法,其关键在于正确判断电路中二极管的工作状态,在外加电压远大于导通电压时,采用理想或恒压降模型进行等效。判断电路中的二极管处于导通状态还是截止状态时,应掌握以下两种基本方法。

(1) 断开二极管,设定参考零电位点,分析电路断开点的开路电压。如果该电压能使二极管正偏,且大于二极管的死区电压,二极管导通;否则二极管截止。

(2) 如果电路中有多个二极管,可先利用方法(1)分别判断各个二极管两端的开路电压,开路电压高的二极管优先导通;当此二极管导通后,再根据电路的约束条件,判断其他二极管的工作状态。

对于稳压管应知道其工作于反向击穿区,有稳定的输出电压,以及稳压管稳压电路中限流电阻的选择方法。

## 2.5 典型例题分析

**【例 2.1】** 在室温(300K)条件下,若二极管的反向饱和电流为  $1\text{nA}$ ,问它的正向电流为  $0.5\text{mA}$  时的外加电压是多少?

**解:** 二极管的伏安特性方程为  $i_D = I_S(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$ , 其中  $V_T=26\text{mV}$ , 将已知参数带入方程,可得

$$\text{故} \quad 0.5 \times 10^{-3} = 1 \times 10^{-9} \left( e^{\frac{v_D}{0.026}} - 1 \right)$$

$$v_D \approx 0.34\text{V}$$

**【例 2.2】** 已知二极管电路如图 2.13 所示,试判断图中二极管是导通还是截止,并确定二极管的输出电压  $V_O$ 。设二极管为理想二极管。

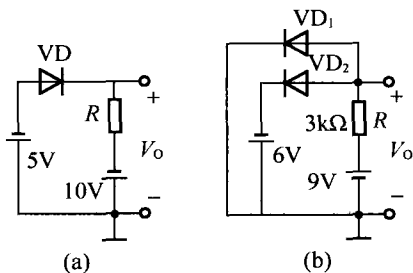


图 2.13 例 2.2 的电路图

**解:** 判断二极管在电路中的工作状态的常用方法是:先假设二极管断开,然后求断开两端的电压,若两端电压大于等于其导通电压(门坎电压),则管子导通,反之则截止。导通后的管压降通常取一个常值(即采用理想模型或恒压降模型)。在用上述方法判断的过程中,如果电路中出现多个二极管,则分析时要用到“优先导通”和“箝位”的概念。对于含有多个二极管的电路,首先求出假设各二极管均断开时的阳极和阴极电位;再比较各二

极管阳极对阴极的电位差, 电位差为正且较高的二极管优先导通(即其他二极管来不及导通时, 它已导通), 然后再决定其他二极管的状态, 如果阳极对阴极电位为负值, 则二极管截止; 最后计算各处电压、电流。

在图 2.13(a)所示的电路中, 只有一个二极管, 假设其断开, 回路中没有电流存在; 那么二极管 VD 两端承受的电压为  $10\text{V} - 5\text{V} = 5\text{V}$ 。二极管接入后处于正向偏置, 故二极管工作在导通状态,  $V_o = -5\text{V}$ 。

在图 2.13(b)所示的电路中, 有多个二极管, 首先将  $\text{VD}_1$  和  $\text{VD}_2$  断开, 得到两个管子承受的电压分别是:  $\text{VD}_1$  为  $9\text{V}$ ;  $\text{VD}_2$  为  $9\text{V} - (-6\text{V}) = 15\text{V}$ ; 二极管  $\text{VD}_2$  承受的正向电压高于  $\text{VD}_1$  的正向电压, 所以  $\text{VD}_2$  优先导通; 由于  $\text{VD}_2$  优先导通, 所以  $\text{VD}_2$  的阳极箝位于  $-6\text{V}$ , 此时  $\text{VD}_1$  因承受反向电压而反向截止。故  $V_o = -6\text{V}$ 。

**【例 2.3】** 假设在图 2.14 中, 二极管是理想的, 试画出在  $v_i = 5\sin(\omega t)\text{V}$  作用下的  $v_o$  波形。

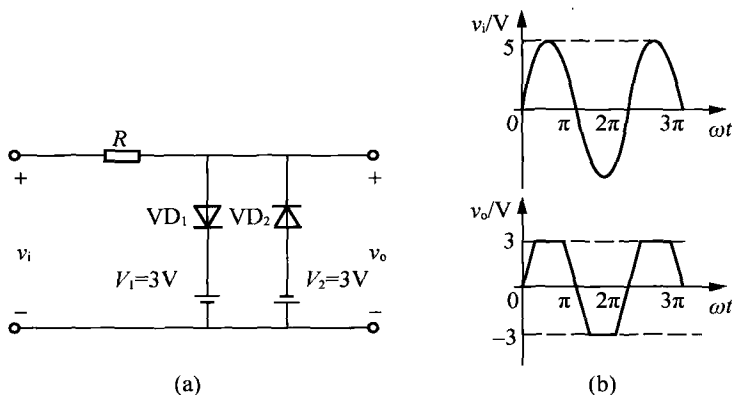


图 2.14 例 2.3 的电路图

**解:** 图 2.14 所示的电路为二极管双向限幅电路, 分析该题的关键是判断二极管的工作状态。

在  $v_i$  的正半周, 当  $v_i > V_1$  时,  $\text{VD}_1$  的阳极电位高于阴极电位,  $\text{VD}_1$  导通, 此时  $v_o$  被限定为  $V_1$ ; 在  $v_i$  的负半周, 当  $|v_i| > V_2$  时,  $\text{VD}_2$  的阳极电位高于阴极电位,  $\text{VD}_2$  导通,  $v_o$  此时被限定为  $V_2$ ; 在  $v_i$  的其他时间间隔内,  $\text{VD}_1$  和  $\text{VD}_2$  均因被施加反向电压而截止, 所以  $v_o$  的波形始终与  $v_i$  的波形相同。

**【例 2.4】** 电路如图 2.15 所示, 二极管为硅管, 输入信号  $v_i = 10\sin(\omega t)\text{mV}$ ,  $V_{\text{CC}} = 10\text{V}$ , 电容器 C 对交流信号的容抗可忽略不计, 试计算输出电压  $v_o$  的交流分量。

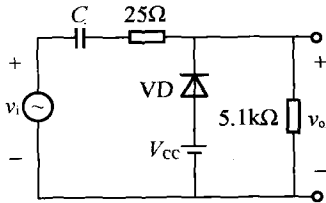


图 2.15 例 2.4 的电路图



**解：**当二极管电路中同时存在较大的直流电源和微变的交流信号时，应该先假设交流信号为零，采用二极管的恒压降模型计算出流过二极管的直流电路，然后再利用二极管的微变等效模型分析计算其交流分量，即先做直流分析再做交流分析。

当交流信号为0，电容器C开路时，流过二极管的直流电流为

$$I_D = \frac{10 - 0.7}{5.1 \times 10^3} \text{ A} \approx 1.82 \text{ mA}$$

此时，可估算出二极管的动态电阻为

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} = \frac{26}{1.82} \Omega \approx 14.3 \Omega$$

在进行交流分析时，令直流电源和电容器短路，二极管可用交流等效电阻代替。电路等效为如图2.16所示的电路，由图2.16可求出输出电压的交流分量为

$$v_o \approx \frac{14.3}{14.3 + 25} v_i \approx 3.6 \sin(\omega t) \text{ mV}$$

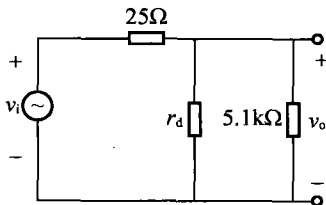


图 2.16 图 2.15 的交流等效电路图

**【例 2.5】** 电路如图 2.17 所示，若稳压管的稳定电压为 12V，最大稳定电流为 20mA，输入电压为 30V，限流电阻为 1.5kΩ，负载电阻为 2kΩ，试求：(1)流过稳压管的电流；(2)负载开路时，流过稳压管的电流；(3)输入电压由 30V 变化到 35V 时，流过稳压管的电流。

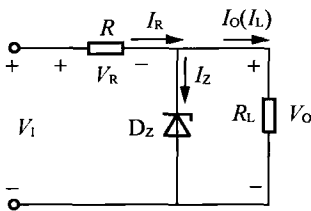


图 2.17 例 2.5 的电路图

**解：**此电路为并联稳压电路。

(1) 当输入电压为 30V 时，因为输入电压在限流电阻和负载电阻之间分压，可得负载电阻上的电压为  $30 \times (2 / (2 + 1.5)) \approx 17 \text{ V}$ ，大于稳压管稳定工作电压 12V，所以稳压管可以正常工作为反向击穿区，输出稳定的电压，有

$$V_O = V_Z = 12 \text{ V}$$

$$I_O = 12 \text{ V} / 2 \text{ k}\Omega = 6 \text{ mA}$$

$$I_R = (V_i - V_O) / R = (30 - 12) \text{ V} / 1.5 \text{ k}\Omega = 12 \text{ mA}$$

$$I_Z = I_R - I_O = 6 \text{ mA}$$

(2) 如果负载开路，流过稳压管的电流即为限流电阻上的电流， $I_Z$  为 12mA。