



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材
中央高校教育教学改革教材建设专项经费资助

电工电子基础

Study Guidance and Answers to Exercises for Analog
Electronic Circuits, Second Edition

模拟电子线路

学习指导与习题详解

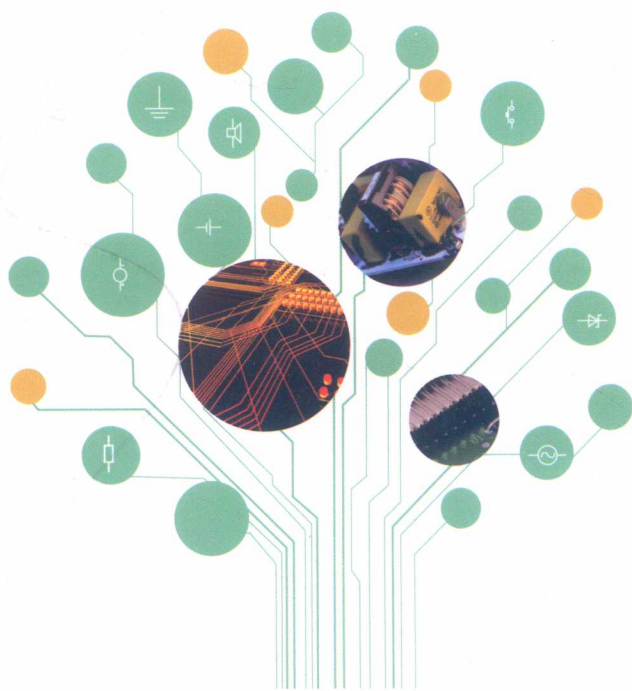
(第2版)

杨凌 主编 李守亮 魏佳璇 参编

Yang Ling

Li Shouliang

Wei Jiaxuan



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Study Guidance and Answers to Exercises for Analog
Electronic Circuits, Second Edition

模拟电子线路学习指导 与习题详解

(第2版)

杨凌 主编 李守亮 魏佳璇 参编
Yang Ling Li Shouliang Wei Jiaxuan

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地总结了“模拟电子线路”课程的基本概念、常用器件、典型电路、各种分析方法,以及这些概念和方法在解题中的应用,包括常用半导体器件、放大电路基础、放大电路的频率响应、低频功率放大电路、集成运算放大器、负反馈及其稳定性、信号的运算与处理电路、信号的产生电路、直流稳压电源、综合测试题及参考答案。全书共分10章,前9章中每章都包含教学要求、基本概念和内容要点、典型习题详解三大部分,共提供了292例(其中包括27例仿真)习题及其详细解答,其题源丰富,覆盖面宽,可以帮助读者加深对课程基本内容的理解和掌握;第10章给出了10套综合测试题及参考答案,综合测试题大部分选自近年来多所国内985与211高校的考研试题,具有较强的针对性、启发性、指导性和补充性,可以帮助读者检查自己对课程的总体掌握水平。书后以附录形式给出了近年来部分高校研究生入学考试真题,可供报考研究生的读者参考。

本书可作为高等学校电子信息类、电气信息类与自动化类专业本科生学习“模拟电子线路”“模拟电子技术基础”等课程的辅导教材,也可作为报考有关专业研究生的读者的复习用书。

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

模拟电子线路学习指导与习题详解/杨凌主编. —2版. —北京:清华大学出版社,2019
(高等学校电子信息类专业系列教材)
ISBN 978-7-302-52592-9

I. ①模… II. ①杨… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN710.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 044612 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:26.25

字 数:636千字

版 次:2015年8月第1版 2019年6月第2版

印 次:2019年6月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:079383-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科技大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	火箭军工程大学
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中国科学院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团股份有限公司
	蒋晓瑜	陆军装甲兵学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋 峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳 伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

第 前言

PREFACE

本书在清华大学出版社出版的《模拟电子线路学习指导与习题详解》(第1版)的基础上,根据“模拟电子线路”课程内容的更新,并吸收广大用书师生的反馈意见,修订而成。

本书除继续保持第1版的特点外,在修订时,密切跟踪电子科学技术的最新发展态势,注重进一步凝练突出课程教学中关于“器件”“电路”“应用”三者之间的逻辑关系,力求以更加简洁、直观的方式突出“模拟电子线路”课程的重点,并突破课程的难点;尽量为不同层次高等院校的师生提供切实可用的参考资料。

具体的修订工作如下:

(1) 根据电子技术发展态势,修订了第1章~第9章的教学要求。

(2) 删减了部分与集成电路系统设计相关性较小的分立元件电路的习题,进一步突出“分立为集成服务”的思想。

(3) 考虑 MOS 场效应器件在电子产品中已逐渐占主导地位,顺应技术发展趋势,增加了与 MOS 场效应器件及电路系统相关的习题。

(4) 进一步强化集成运算放大器的内容,除双极型电压模集成运放外,突出特定应用场景下的单极型、混合型以及电流模运放的内容。

(5) 对国内高校电子信息类、电气信息类以及自动化类相关专业硕士研究生的入学考试试题进行了大量的调研,以附录形式提供了国防科学技术大学、北京交通大学、山东大学、哈尔滨工业大学4所高校近年来的研究生入学考试真题,以帮助读者全面、系统地评估自己对课程内容的理解和掌握程度。

本书除可作为高等院校本科生学习“模拟电子线路”课程的辅导书之外,也可供报考硕士研究生的考生复习时参考,还可作为高等院校教师的教学参考书。

本书由杨凌主编,杨凌编写第1章~第9章,李守亮编写第10章及附录,魏佳璇完成了书中所有的仿真习题。

本书获得中央高校教育教学改革教材建设专项经费资助,在此深表感谢!此外,在国内各高校相关专业硕士研究生入学考试真题的收集过程中,陈丽、符艳平、陈沫寒、朱昶文、赵朕等同学做了大量的工作,在此表示特别的谢意!

限于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评和指正。

作 者

2019年3月

第1版前言

PREFACE

“模拟电子线路”是电子信息类、电气类、自动化类等专业的基础平台课程,其内容庞杂,具有“三多”(概念多、方法多、电路多)和“三强”(理论性强、工程性强、应用性强)的特点,且重点、难点集中,教与学都有困难。因此,为本课程编写一本适用的学习辅导教材是很有必要的。

作者根据多年来积累的教学经验,结合课程内容的重点和难点,考虑到学习者的实际需求编写了此书。编写时,制定了“优化体系、提炼重点,强调概念、突破难点,复习巩固、联系考研”的编写原则,力求内容体现科学性、先进性和指导性,尽量为不同院校的师生提供切实可用的参考资料。

本书具有如下特点:

(1) 不针对现有的任何主教材,力求较全面地概括和总结“模拟电子线路”课程的基本知识内容,形成独立的体系结构,使本书能配合不同的教材,适用于不同院校的师生使用。

(2) 叙述简洁清晰,充分利用图、表等形象化的语言概括总结常用器件、典型电路及各种分析方法的知识点。

(3) 针对目前大多数教材中习题增多、例题减少,学生能听懂课、读懂书,但不会做题的现象,精选大量的典型习题,并给出详细解答,以帮助读者掌握课程的重点和难点。

(4) 在典型习题的解析过程中,注重剖析题目的设计思想、归纳解题要领、介绍解题技巧,并注重难点释疑,启发思维,以使读者澄清模糊概念、深刻领会重要概念的实质并开拓思路。

(5) 提供大量的仿真习题及其详解,旨在通过直观简洁的方法强调重点、突破难点。

(6) 综合测试题选编和改编了近年来国内外优秀教材的典型习题及国内多所“985”、“211”高等院校的考研试题,题目类型多、范围广,知识覆盖面宽,在紧扣重点、难点的前提下,难、易并举,适合于读者自测练习或考研复习时使用。

本书除可作为高等院校本科生学习“模拟电子线路”课程的辅导书之外,也可供有志报考硕士研究生的考生复习时参考,同时还可作为高等院校教师的教学参考书。

本书获得兰州大学信息科学与工程学院本科教材出版基金资助,在此致以深深的谢意!限于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评和指正。

作者

2015年5月

2. 试计算电路的正向阈值电压和负向阈值电压。

3. 若将如图 13(b) 所示的电压信号加到如图 13(a) 所示电路的输入端, 试画出输出电压的波形。

图书资源支持

感谢您一直以来对清华版图书的支持和爱护。为了配合本书的使用, 本书提供配套的资源, 有需求的读者请扫描下方二维码, 在图书专区下载, 也可以拨打电话或发送电子邮件咨询。

如果您在使用本书的过程中遇到了什么问题, 或者有相关图书出版计划, 也请您发邮件告诉我们, 以便我们更好地为您服务。

我们的联系方式:

地址: 北京市海淀区双清路学研大厦 A 座 701

邮编: 100084

电话: 010-62770175-4608

资源下载: <http://www.tup.com.cn>

客服邮箱: tupjsj@vip.163.com

QQ: 2301891038 (请写明您的单位和姓名)

教学交流、课程交流



清华电子



扫一扫, 获取最新目录

用微信扫一扫右边的二维码, 即可关注清华大学出版社公众号“清华电子”。

目录

CONTENTS

第1章 常用半导体器件	1
1.1 教学要求	1
1.1.1 半导体物理基础知识	1
1.1.2 晶体二极管	1
1.1.3 双极结型晶体管(BJT)	1
1.1.4 场效应晶体管(FET)	1
1.2 基本概念和内容要点	2
1.2.1 半导体物理基础知识	2
1.2.2 晶体二极管	5
1.2.3 双极结型晶体管(BJT)	9
1.2.4 场效应晶体管(FET)	13
1.3 典型习题详解	16
第2章 放大电路基础	46
2.1 教学要求	46
2.2 基本概念和内容要点	46
2.2.1 放大电路的基本概念	46
2.2.2 BJT放大电路	51
2.2.3 FET放大电路	53
2.2.4 多级放大电路	55
2.3 典型习题详解	55
第3章 放大电路的频率响应	94
3.1 教学要求	94
3.2 基本概念和内容要点	94
3.2.1 表征放大电路频率响应的主要参数和波特图的表示方法	94
3.2.2 放大电路频率响应的分析方法	96
3.2.3 基本放大电路的频率响应	98
3.2.4 多级放大电路的频率响应	102
3.2.5 放大电路的瞬态响应	102
3.3 典型习题详解	103
第4章 低频功率放大电路	117
4.1 教学要求	117
4.2 基本概念和内容要点	117
4.2.1 功率放大电路的特点和主要研究问题	117

4.2.2	低频功率放大电路的分类	118
4.2.3	乙类双电源互补对称功率放大电路	119
4.2.4	甲乙类双电源互补对称功率放大电路	121
4.2.5	单电源互补对称功率放大电路	121
4.2.6	桥式功率放大电路	122
4.2.7	集成功率放大器	122
4.3	典型习题详解	122
第5章	集成运算放大器	142
5.1	教学要求	142
5.2	基本概念和内容要点	142
5.2.1	集成运算放大器的组成及特点	142
5.2.2	电流源电路	143
5.2.3	差分放大电路	144
5.2.4	集成运算放大器	148
5.3	典型习题详解	150
第6章	负反馈及其稳定性	189
6.1	教学要求	189
6.2	基本概念和内容要点	189
6.2.1	反馈的基本概念	189
6.2.2	负反馈放大电路的四种组态	191
6.2.3	负反馈对放大电路性能的影响	192
6.2.4	深度负反馈放大电路的近似估算	193
6.2.5	负反馈放大电路的稳定性	194
6.3	典型习题详解	196
第7章	信号的运算与处理电路	223
7.1	教学要求	223
7.2	基本概念和内容要点	223
7.2.1	理想运放的条件及特点	223
7.2.2	信号运算电路	224
7.2.3	精密整流电路	228
7.2.4	有源滤波电路	228
7.2.5	电压比较器	230
7.3	典型习题详解	231
第8章	信号的产生电路	269
8.1	教学要求	269
8.2	基本概念和内容要点	269
8.2.1	正弦波振荡器的工作原理	269
8.2.2	RC正弦波振荡电路	271
8.2.3	LC正弦波振荡电路	271
8.2.4	高频率稳定度的典型振荡电路	272
8.2.5	非正弦波信号产生电路	273
8.3	典型习题详解	273

第 9 章 直流稳压电源	301
9.1 教学要求	301
9.2 基本概念和内容要点	301
9.2.1 小功率直流稳压电源的组成	301
9.2.2 单相桥式整流、电容滤波电路	302
9.2.3 线性稳压电路	302
9.3 典型习题详解	304
第 10 章 综合测试题及参考答案	316
10.1 综合测试题一	316
参考答案	320
10.2 综合测试题二	321
参考答案	323
10.3 综合测试题三	323
参考答案	327
10.4 综合测试题四	329
参考答案	331
10.5 综合测试题五	332
参考答案	335
10.6 综合测试题六	336
参考答案	340
10.7 综合测试题七	341
参考答案	344
10.8 综合测试题八	345
参考答案	348
10.9 综合测试题九	350
参考答案	353
10.10 综合测试题十	354
参考答案	357
参考文献	359
附录 部分高校近年来硕士研究生入学考试试题选编	360
附录 A 国防科学技术大学 2014—2016 年硕士研究生入学考试试题	360
附录 B 北京交通大学 2012—2014 年硕士研究生入学考试试题	365
附录 C 山东大学 2015—2017 年硕士研究生入学考试试题	372
附录 D 哈尔滨工业大学 2014—2016 年硕士研究生入学考试试题	389

第1章

CHAPTER 1

常用半导体器件

1.1 教学要求

1.1.1 半导体物理基础知识

- (1) 熟悉本征半导体、杂质半导体、施主杂质、受主杂质、多子、少子、漂移、扩散的概念。
- (2) 熟悉 PN 结的形成机理和基本特性——单向导电性、击穿特性、电容效应。

1.1.2 晶体二极管

- (1) 了解二极管的结构、分类、符号及主要参数。
- (2) 熟悉二极管的几种模型表示——数学模型、曲线模型、简化电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合。
- (3) 了解几种特殊二极管的性能。
- (4) 熟悉二极管电路的基本分析方法——图解分析法、等效电路分析法,能熟练运用等效电路分析法分析各种功能电路。

1.1.3 双极结型晶体管(BJT)

- (1) 了解 BJT 的结构、符号、分类。
- (2) 掌握 BJT 在放大状态下的电流分配关系。
- (3) 熟悉 BJT 处在放大、饱和、截止三种工作状态下的条件及特点。
- (4) 熟悉 BJT 的主要参数及温度对参数的影响。
- (5) 熟悉 BJT 的几种模型表示——数学模型、曲线模型、简化电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合。
- (6) 熟练掌握 BJT 工作状态的判断方法。

1.1.4 场效应晶体管(FET)

- (1) 了解 FET 的结构、符号、分类、主要参数,熟悉其工作原理。
- (2) 熟悉 FET 的几种模型表示——数学模型、曲线模型、简化电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合。

- (3) 熟悉放大状态下几种 FET 的外部工作条件。
- (4) 熟悉 FET 与 BJT 之间的异同点。

1.2 基本概念和内容要点

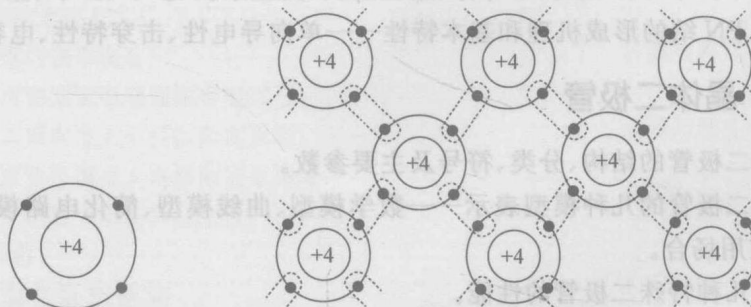
1.2.1 半导体物理基础知识

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,其导电能力随温度、光照或所掺杂质的不同而显著变化,特别是掺杂可以改变半导体的导电能力和导电类型。半导体广泛应用于各种器件及集成电路的制造。

1. 本征半导体

高度提纯、几乎不含任何杂质的半导体称为本征半导体。

硅(Si)和锗(Ge)是常用的半导体材料,均属四价元素,原子序号分别为 14 和 32,它们的原子最外层均有四个价电子,与相邻四个原子的价电子组成共价键。制造半导体器件的硅和锗材料被加工成单晶结构。图 1.1(a)、(b)分别是硅、锗原子的简化模型和它们的晶体结构平面示意图。



(a) 硅、锗原子的简化模型

(b) 硅、锗原子的晶体结构平面示意图

图 1.1 硅、锗原子

1) 本征激发

共价键中的价电子受激发获得能量并摆脱共价键的束缚而成为“自由电子”(简称电子),并在原共价键的位置上留下一个“空位”(称空穴),这一过程称为本征激发。

热、光、电磁辐射等均可导致本征激发,但热激发是半导体材料中产生本征激发的主要因素。

本征激发产生成对的电子和空穴。

2) 复合

电子被共价键俘获,造成电子-空穴对消失,这一现象称为复合。

3) 载流子

电子和空穴均是能够自由移动的带电粒子,称为载流子。半导体中存在两种类型的载流子,空穴的出现是半导体区别于导体的重要特征。

4) 热平衡载流子浓度

当温度一定时,半导体中本征激发和复合在某一热平衡载流子浓度值上达到动态平衡。

该浓度值为

$$n_i = p_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}} \quad (1-1)$$

其中:

$$A = \begin{cases} 3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2} & (\text{Si}) \\ 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2} & (\text{Ge}) \end{cases}$$

$$E_{g0} (T = 0\text{K 时的禁带宽度}) = \begin{cases} 1.21\text{eV} & (\text{Si}) \\ 0.785\text{eV} & (\text{Ge}) \end{cases}$$

k (玻尔兹曼常数) = $8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

n_i, p_i 与 T 成指数关系, 随温度升高而迅速增大。室温下 ($T = 300\text{K}$ 即 27°C), 有

$$n_i \approx \begin{cases} 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} & (\text{Si}) \\ 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} & (\text{Ge}) \end{cases}$$

n_i 的数值虽然很大, 但它仅占原子密度 (例如, 硅的原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) 很小的百分数, 故本征半导体的导电能力很弱 (例如, 本征硅的电阻率约为 $2.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$)。

2. 杂质半导体

在本征半导体中, 掺入一定量的杂质元素, 就成为杂质半导体。

1) N 型半导体 (电子型半导体)

在本征硅 (或锗) 的晶体中掺入五价施主杂质 (如磷、砷) 而成。其中多子是电子, 少子是空穴, 还有束缚在晶格中不能自由移动 (不参与导电) 的施主正离子。

2) P 型半导体 (空穴型半导体)

在本征硅 (或锗) 的晶体中掺入三价受主杂质 (如硼、镉) 而成。其中多子是空穴, 少子是电子, 还有束缚在晶格中不能自由移动 (不参与导电) 的受主负离子。

杂质半导体中, 多子的浓度取决于掺杂的多少, 其值几乎与温度无关, 且少量的掺杂便可导致载流子几个数量级的增加, 故杂质半导体的导电能力显著增大。而少子由本征激发产生, 其浓度主要取决于温度, 少子浓度具有温度敏感性。

需要强调的是: 杂质半导体依然呈电中性。

3) 转型

在 N 型半导体中掺入比原有的五价杂质元素更多的三价杂质元素, 可转型为 P 型; 在 P 型半导体中掺入足够的五价杂质元素, 可转型为 N 型。

4) 半导体的两种导电机理——漂移和扩散

载流子在外电场作用下的定向运动称为漂移运动, 所形成的电流称为漂移电流。漂移电流的密度为

$$J_t = J_{pt} + J_{nt} = q(p\mu_p + n\mu_n)E \propto E$$

式中, $q (= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$ 为电子电荷量; p, n 分别为空穴和电子的浓度; μ_p, μ_n 分别为空穴和电子的迁移率 (迁移率表示单位场强下载流子的平均漂移速度, 它影响半导体器件的工作频率); E 为外加电场强度。

因浓度差而引起的载流子的定向运动称为扩散运动, 所形成的电流称为扩散电流。电子和空穴的扩散电流密度分别为

$$J_{nd} = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = qD_n \frac{dn(x)}{dx}, \quad J_{pd} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

式中, q 为电子电荷量; D_n 、 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数(其值随温度升高而增大); $dn(x)/dx$ 、 $dp(x)/dx$ 分别为电子和空穴的浓度梯度。

3. PN 结

PN 结是构造半导体器件的基本单元。

1) PN 结的形成

利用掺杂工艺,把 P 型半导体和 N 型半导体在原子级上紧密结合,P 区和 N 区的界面处产生了载流子的浓度差,导致多子互相扩散,进而形成了 PN 结,如图 1.2 所示。

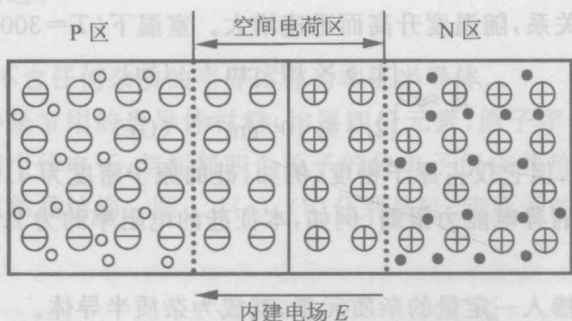


图 1.2 PN 结的形成

PN 结的形成过程可简述如下。

载流子浓度差 → 多子扩散 → 电中性被破坏 → 空间电荷区(内电场) →

{ 阻碍多子扩散
 利于少子漂移 } 当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时 → 形成一定厚度的 PN 结

2) PN 结的单向导电性

正偏时,外电场削弱内电场,PN 结变薄,势垒电压降低,利于多子扩散,不利于少子漂移,由多子扩散形成较大的正向电流。PN 结呈现低阻,处于正向导通状态。

反偏时,外电场增强内电场,PN 结变厚,势垒电压增大,不利于多子扩散,但利于少子漂移,由少子漂移形成很小的反向饱和电流 I_s 。PN 结呈现高阻,处于反向截止状态。

3) PN 结的击穿特性

当加在 PN 结上的反偏压超过一定数值时,反向电流急剧增大,这种现象称为击穿。按击穿机理的不同,击穿可分为齐纳击穿和雪崩击穿两种。齐纳击穿发生于重掺杂的 PN 结中,击穿电压较低($<5V$)且具有负的温度系数;雪崩击穿发生于轻掺杂的 PN 结中,击穿电压较高($>7V$)且具有正的温度系数。

当 PN 结击穿后,若降低反偏压,PN 结仍可恢复,这种击穿称为电击穿。电击穿是可以利用的,稳压二极管便是根据这一原理制成的。当 PN 结击穿后,若继续增大反偏压,会使 PN 结因过热而损坏,这种击穿称为热击穿。热击穿是要力求避免的。

4) PN 结的电容效应

PN 结的结电容 C_j 由势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 组成($C_j = C_B + C_D$)。正偏时以扩散电容为主;反偏时以势垒电容为主。利用势垒电容效应可制成变容二极管。

1.2.2 晶体二极管

晶体二极管简称二极管,是由一个 PN 结,再加上电极、引线封装而成的。

1. 二极管的结构、分类、符号

表 1.1 列出了二极管的分类及用途。

表 1.1 二极管的分类及用途

分类方法		主要类型
制作工艺		合金型二极管、扩散型二极管、合金扩散型二极管、外延型二极管
结构形态		点接触二极管、面接触二极管、平面二极管、肖特基势垒二极管、PIN 二极管、体效应二极管、双基极二极管、双向二极管
应用范围	普通应用	检波二极管、整流二极管、稳压二极管、开关二极管、恒流二极管
	光电应用	光电二极管、太阳能电池、发光二极管、激光二极管
	微波应用	变容二极管、阶跃恢复二极管、崩越二极管、隧道二极管、肖特基势垒二极管、体效应二极管
	敏感应用	温敏二极管、磁敏二极管、力敏二极管、气敏二极管、湿敏二极管、光敏二极管

其中,点接触和平面二极管是常用的两种。前者结面积小,结电容小,适用于高频、小电流的场合,如检波电路;后者的形式较多,有结面积大的,因此结电容也大,适用于低频、大电流的场合,如整流电路。

二极管的符号如图 1.3 所示。



图 1.3 二极管的符号

2. 二极管的主要电参数及其温度特性

1) 直流参数

二极管的直流参数有最大整流电流 I_F 、正向导通压降 $V_{D(on)}$ 、反向电流 I_R 、反向击穿电压 V_{BR} 和直流电阻 R_D 。

2) 交流参数

二极管的交流参数有交流电阻 r_d 、结电容 C_j 和最高工作频率 f_M 。

每一型号的二极管,在技术手册中的上述参数总是给出极值。

3) 温度对二极管参数的影响

温度每升高 10°C , I_R 约增大一倍;温度每升高 1°C , $V_{D(on)}$ 减小 $2\sim 2.5\text{mV}$ 。

3. 二极管的模型

二极管的内部结构实际上就是一个 PN 结,其伏安特性有不同的表示方法,可表示为不同的模型。

1) 数学模型

二极管的伏安特性可用指数函数来描述,即

$$i_D = I_S(e^{v_D/nV_T} - 1) \tag{1-2}$$

式中, I_S 为反向饱和电流; $V_T = \frac{kT}{q}$ 为热电压,室温下约为 26mV ; n 为发射系数,若无特别说明,通常取 $n=1$,即

$$i_D = I_S(e^{v_D/V_T} - 1) \tag{1-3}$$

式(1-3) 可用来统一描述二极管的正向导通特性和反向截止特性。当二极管正偏,且

v_D 为 V_T 的几倍以上时, $i_D \approx I_S e^{v_D/V_T}$, 流过二极管的电流随外加电压的增加按指数规律增加; 当二极管反偏, 且 $|v_D|$ 为 V_T 的几倍以上时, $i_D \approx -I_S$, 反向电流与外加反向电压无关, 近似为常数。

2) 曲线模型

二极管的伏安特性曲线如图 1.4 所示。它非常直观地表明了二极管的主要特性: 正向导通特性, 如图中①段曲线部分, 其中, $V_{D(on)}$ 为正向导通压降; 反向截止特性, 如图中②段曲线部分, 其中, I_R 为反向电流; 反向击穿特性, 如图中③段曲线部分, 其中, V_{BR} 为反向击穿电压。

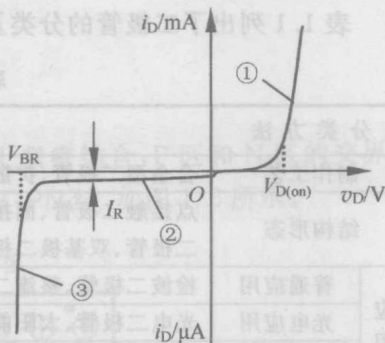


图 1.4 二极管的伏安特性曲线

3) 简化电路模型

二极管的简化电路模型分为大信号模型和小信号模型。

(1) 大信号模型。二极管是一种非线性器件, 在大信号工作时, 其非线性主要表现为单向导电性, 导通后所呈现的非线性往往是次要的。因此可用分段线性模型对二极管进行建模, 常用以下三种简化电路模型。

当外加电压幅度远大于 $V_{D(on)}$, 导通电阻 R_D 与外电路相比可以忽略时, 二极管可看作是理想的开关器件, 理想二极管的伏安特性和电路符号如图 1.5(a) 所示。

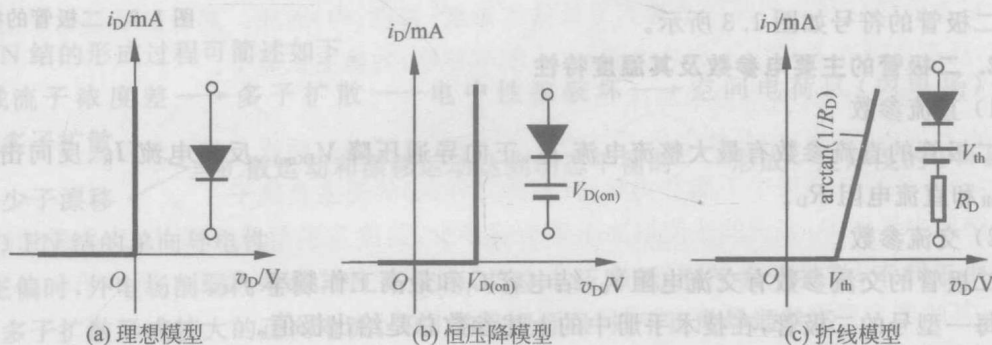


图 1.5 二极管的大信号简化电路模型

与外电路相比, 当 R_D 可以忽略, 但 $V_{D(on)}$ 不能忽略时, 可用恒压降模型表示实际的二极管, 其伏安特性和电路符号如图 1.5(b) 所示。

与外电路相比, 当 R_D 和 $V_{D(on)}$ 都不能忽略时, 可用折线模型表示实际的二极管, 其伏安特性和电路符号如图 1.5(c) 所示, 图中, V_{th} 为二极管的开启电压。

(2) 小信号模型。小信号模型用来分析二极管导通后, 叠加在静态点(Q点)之上的微小增量电压和增量电流之间的关系。低频时可用交流电阻 r_d 来表示, 如图 1.6(a) 所示。

$$r_d \approx \frac{26(\text{mV})}{I_{DQ}(\text{mA})} \quad (1-4)$$

式中, I_{DQ} 是二极管的静态工作电流。

在高频电路中, 由于二极管的结电容 C_j 呈现的容抗很小, 因此, 其单向导电性能会因 C_j 的交流旁路作用而变差, 所以, 在高频电路中, C_j 的作用不能忽视。高频时, 二极管的小信号

模型如图 1.6(b)所示。

4. 几种特殊的二极管

1) 稳压二极管

稳压二极管是利用 PN 结反向击穿后具有稳压特性制成的,主要用于稳压电路,也常用于构成限幅电路。主要参数有:稳定电压 V_Z 、稳定电流 I_Z 、动态电阻 r_z 、额定功率 P_Z 及 V_Z 的温度系数 α 。其电路号如图 1.7(a)所示。

2) 变容二极管

PN 结内电场两侧的异极性电荷构成电容。根据 $C = \epsilon S/d$ 原理,PN 结电容的极板面积 S 是定值,而极板等效间距 d 随反向电压的增大而变大,结电容随之减小。利用此特点可制成变容二极管,其电路符号如图 1.7(b)所示。变容二极管是应用十分广泛的一种半导体器件,常用于谐振回路的电调谐、压控振荡器、频率调制、参量电路等。

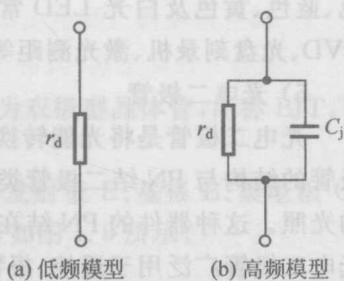


图 1.6 二极管的小信号模型

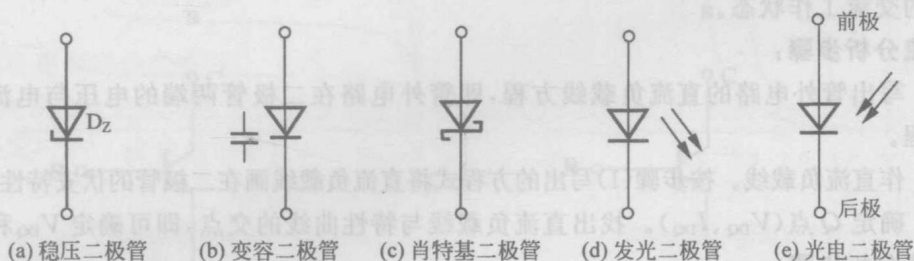


图 1.7 几种特殊二极管的电路符号

3) 肖特基二极管

金、银、铂、铝等金属的自由电子浓度比 N 型半导体还低,这些金属与 N 型半导体结合时也能形成内电场及单向导电性,根据这一原理制成的二极管称肖特基二极管,它是以其发明者肖特基博士的名字命名的,其电路符号如图 1.7(c)所示。肖特基二极管的正向导通电压较低,只有 0.4V 左右,反向恢复时间极短,小到几纳秒,故功耗低、频响好,但反向耐压低。常用于开关电源、变频器、驱动器、微波通信等电路,作高频、低压、大电流整流二极管、续流保护二极管或检波二极管使用。

4) 发光二极管

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是将电能转换为光能的一种半导体器件,其电路符号如图 1.7(d)所示。

正向电流从 P 区到 N 区持续流过 PN 结的过程,就是电子源源不断从 N 区运动到 P 区的过程。按照能带理论,也是电子源源不断从高能级跌落到低能级的过程。电子从高能级跌落到低能级,必然伴随着能量的连续释放,电能可以以热能形式释放,也可以以光能形式释放。普通二极管正向导电过程中,能量以热能形式释放,而发光二极管中,能量以光能形式连续释放。

最早制成的是红色 LED、红外 LED、绿色 LED、黄色 LED 等,后来又陆续制成激光二极管、蓝色 LED、白光 LED。发光二极管的正向导通压降比普通硅二极管大。红色、绿色及黄色 LED 的正向导通压降约为 2V,蓝色 LED 及白光 LED 的可高达 3V 左右。红色、绿