



高等学校电子信息类专业规划教材

模拟电子技术基础教程

李祥臣 主 编
卢留生 副主编



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材

模拟电子技术基础教程

李祥臣 主 编

卢留生 副主编

清华大学出版社

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分8章,即半导体二极管及其电路分析、BJT及其放大电路、FET及其模拟电路、集成运算放大器、负反馈与集成运放的线性应用、信号发生电路、功率电路及模拟电路的计算机仿真教学,将负反馈与集成运放线性应用结合在一起,加强了两者之间的联系,避免了不必要的重复。频率响应放在第2章中介绍,主要采用计算机仿真来讲述。第8章包含28个仿真演示,可供仿真演示或虚拟实验时选用。

本书在内容上力求简明与实用;在编排上注重教法与学法;在讲述上注重基本概念、电路构思过程和分析思路的阐述;对教学中容易混淆的一些问题进行了较深入的探讨。

本书可作为电子工程、自动控制、工业自动化、电子信息与计算机应用等专业本科、专科“模拟电路”课程的基本教材和教学参考书,也可作为工程技术人员和自学学员学习的用书。

版权所有,翻印必究。

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。

(本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。)

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础教程/李祥臣主编;卢留生副主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2005. 1

(21世纪高等学校电子信息类专业规划教材)

ISBN 7-81082-476-7

I. 模… II. ①李… ②卢… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第003669号

责任编辑:陈川

出版者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×260 印张:24.75 字数:598千字

版次:2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

书号:ISBN 7-81082-476-7/TN·27

印数:1~5000册 定价:32.00元

前 言

模拟电子技术基础是电子信息类、电气类、机电类专业必修的技术基础课，也是非电类专业电子技术课程的主要教学内容。教学实践表明，本课程具有“入门难”的特点。教学基本要求定位为“入门性质”的技术基础课。本课程的难点主要表现在3个方面。

1. 本课程涉及的知识领域比较广

本课程从实际的半导体器件出发，讲述器件的基本特性、模拟电路构成原理及其电路分析（与设计）方法；讲述半导体器件时往往又要从半导体及半导体器件内部微观机理讲起，然后介绍半导体器件非线性伏-安特性、电容效应、主要参数及其温度特性等。就是最简单的基本放大电路，也包含着直流与交流、静态与动态、低频与高频、小信号与大信号、线性与非线性等问题。由于教学中涉及的知识领域较宽，而教材中又不可能详细介绍，所以初学者感到“杂、乱、难”，即内容杂，头绪乱，难理解。因此，如何降低本课程入门的“门槛”，如何选择半导体基础知识的“切入点”，是一个值得探讨的问题。

2. 本课程具有明显的“工程性质”

针对实际半导体器件的复杂性，器件的功能、电路模型及应用电路的分析需要根据实际情况采用不同的处理方法。这就要求初学者要尽快树立“工程近似的观点”，学会抓主要矛盾，掌握具体情况具体分析的方法。然而，对于初学者而言，由于还不具备必要的基础知识和实践经验，掌握“具体情况具体分析”的分析方法是最困难的。事实上，“具体情况具体分析”的出发点是为了简化分析过程、降低计算难度和工作量，以适应人们有限的“手工”计算能力。在计算机仿真和CAD技术应用十分广泛的今天，如何处理“手工”计算和“计算机仿真分析”的关系，是本课程教学改革研究的一个重要课题。

3. 本课程具有很强的实践性

实践证明：对于技术性、实践性很强的课程，不能只通过读书来学习。没有足够的实践环节的配合，是不可能真正掌握模拟电子技术的。由于本课程涉及的知识领域比较宽，实验所需要的仪器设备较多，实验中遇到的问题比较复杂，因此做好模拟电子技术实验是比较困难的。如果实验条件不具备和基本技能训练学时不够，则初学者就不能将所学的知识转化为实际应用能力。因此，精简教学内容、加强实践环节和利用现代化教学工具提高教学效果，是模拟电子技术基础课程改革的根本出路。

基于上述认识，本书将从下列3个方面进行探索。

1. 降低“入门门槛”，避开半导体器件微观机理的讲述

从PN结和半导体器件的伏-安特性入手，重点讲述器件特性的非线性与主要参数。为了弥补器件内部工作原理知识的不足，器件内部导电机理以自学选读资料的形式出现，在初学者了解半导体器件的基本性能之后，可作为进一步学习的参考材料。

2. 贯穿两条基本线索，精选模拟电路的基本内容

本书以半导体器件特性的非线性、电容效应、温度特性为出发点，讲述器件（或组件）不同工作状态下的基本功能、电路模型、应用电路构成及其分析方法，贯穿一条如

何分析问题和解决问题的基本线索（主线）；以反馈概念与反馈理论为依据，讲述反馈在信号放大、信号处理、信号发生和稳定电源电路中的应用，贯穿一条反馈技术在模拟电路中应用的基本线索（辅线）。

全书共分8章。前7章为低频模拟电子技术的基本内容，即半导体二极管及其电路分析、BJT及其放大电路、FET及其模拟电路、集成运算放大器、负反馈与集成运放的线性应用、信号发生电路及功率电路，并将负反馈与集成运放线性应用揉在一起，加强了两者的必然联系，避免了讲述内容上的重复；将功率放大电路与整流稳压电源合为功率电路；频率响应放在第2章中介绍，并主要采用EWB仿真演示来讲述。第8章为模拟电路的计算机仿真教学。章后的自学选读资料可作为知识的扩充和应用参考材料。本教程注重对基本概念、电路构思及分析思路的阐述，在讲述方法上多处进行了新的探索与尝试。

3. 充分利用 EWB 仿真软件，把讲解与演示结合在一起

第8章模拟电路的计算机仿真教学结合实例介绍了EWB仿真软件的使用方法，设计了28个模拟电路仿真演示贯穿教材的主要内容。师生可根据教学进程选择仿真演示内容，只要将EWB软件拷贝在U盘上，随时随地可以上机使用，进行仿真演示、虚拟实验和习题仿真。电子技术课程计算机仿真教学，促进了电子技术教学改革步伐，改变着电子技术的授课方式、学习方式和考查方式；直观、形象、逼真，既可以深化学习内容，又可以弥补因实验条件的不足给教学效果带来的影响；界面友好，使用简便，对硬件环境要求不高，容易为初学者掌握。实践表明，EWB仿真软件是一个良好的电子技术辅助教学工具，是随身携带的超大型电子实验室，是电子技术研究与开发的工作平台。

本书第1、5、6、7、8章由李祥臣教授撰写；胡长超副教授撰写第3、4章；朱忠义副教授撰写了第2章。全书由李祥臣负责修改与定稿；卢留生副教授完成全书的绘图、文字编辑和部分文字输入等大量细致工作。参加本书编写工作的还有郭明妹、李路遥、邓明春、范晓勇、李世超、岳彩青、胡明昕、李伟光、牛光辉等，他们在文字输入、电路实验、EWB仿真及数据处理等方面做了很多具体工作。在本书的编写过程中，始终得到解放军信息工程大学信息科技研究所及模拟与数字教研室的大力支持与帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促和业务水平所限，书中难免错误或欠妥之处，诚恳欢迎同行专家与广大读者批评赐教，并表示由衷的感谢。

编者
2005年1月

目 录

第 1 章 半导体二极管及其电路分析	(1)
1.1 PN 结及其非线性伏 - 安特性	(1)
1.1.1 本征半导体	(1)
1.1.2 杂质半导体	(1)
1.1.3 PN 结	(2)
1.2 半导体二极管的特性曲线及主要参数	(4)
1.2.1 普通二极管的伏 - 安特性曲线	(5)
1.2.2 普通二极管的主要参数	(5)
1.2.3 稳压二极管	(7)
1.3 二极管电路的分析方法	(8)
1.3.1 图解分析法	(9)
1.3.2 简化模型分析法	(9)
1.4 半导体二极管应用电路	(12)
1.4.1 二极管整流电路	(12)
1.4.2 二极管限幅电路	(12)
1.4.3 二极管电平选择电路	(13)
1.4.4 稳压二极管稳压电路	(14)
小结	(15)
自学选读资料	(16)
第一部分 半导体的共价键理论	(16)
第二部分 半导体器件型号命名方法和国产半导体二极管主要参数	(23)
思考题与习题	(25)
EWB 仿真实验	(28)
第 2 章 双极型三极管及其放大电路	(29)
2.1 双极型三极管	(29)
2.1.1 BJT 的原理性结构、分类及其电路符号	(29)
2.1.2 BJT 三极电流关系	(29)
2.1.3 BJT 的电流放大作用	(31)
2.1.4 BJT 的流控开关作用	(32)
2.2 BJT 的伏 - 安特性曲线及主要参数	(34)
2.2.1 BJT 共射特性曲线	(34)
2.2.2 BJT 的主要参数	(36)
2.3 BJT 的偏置电路与直流分析	(38)

2.3.1	BJT 的直流模型分析法	(38)
2.3.2	BJT 直流偏置电路的图解分析法	(42)
2.3.3	BJT 的直流电压传输特性	(43)
2.4	放大电路的构成及其性能指标	(45)
2.4.1	放大电路组成的基本原则及三种耦合方式放大电路的构成	(45)
2.4.2	小信号放大电路分析的基本思路	(47)
2.4.3	小信号放大电路的性能指标	(48)
2.5	放大电路的交流图解分析	(50)
2.5.1	交流负载线	(50)
2.5.2	放大电路的动态图解	(51)
2.5.3	直流工作点与放大电路非线性失真的关系	(51)
2.6	放大电路交流模型分析法	(54)
2.6.1	BJT 低频小信号电路模型	(54)
2.6.2	典型共射放大电路的交流分析	(57)
2.6.3	无射极旁路电容 C_E 的共射放大电路	(58)
2.7	共集电极放大电路与共基极放大电路	(60)
2.7.1	共集电极放大电路	(60)
2.7.2	共基极放大电路	(62)
2.7.3	BJT 三种放大组态的性能比较	(63)
2.8	BJT 多级放大电路	(64)
2.8.1	级间耦合	(64)
2.8.2	多级放大电路性能指标的计算	(66)
2.9	BJT 放大电路的频率响应	(68)
2.9.1	关于小信号放大电路交流分析的反思	(68)
2.9.2	放大电路的频率特性曲线	(69)
2.9.3	频率失真及不失真传输条件	(70)
2.9.4	包含电容元件的共射放大电路的等效电路	(71)
2.9.5	单级共射放大电路频率特性的 EWB 仿真	(72)
	小结	(74)
	自学选读资料	(75)
	第一部分 放大状态下 BJT 内部载流子的传输过程及其电流分配关系	(75)
	第二部分 BJT 高频小信号电路模型及频率参数	(77)
	思考题与习题	(82)
	仿真练习题	(92)
第 3 章	场效应管及其模拟电路	(93)
3.1	结型场效应管(JFET)	(93)
3.1.1	N 沟道结型场效应管的输出特性曲线	(93)
3.1.2	N 沟道结型场效应管的转移特性曲线	(95)
3.2	金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)	(95)

3.2.1	N 沟道增强型 MOSFET	(96)
3.2.2	E - NMOSFET 的特性曲线	(97)
3.2.3	N 沟道耗尽型 MOSFET	(97)
3.2.4	各种 FET 的结构符号与特性曲线的比较	(98)
3.3	FET 的主要参数和小信号模型	(100)
3.3.1	FET 的主要参数	(100)
3.3.2	FET 低频小信号模型	(101)
3.4	场效应管放大电路	(101)
3.4.1	FET 的直流偏置电路	(102)
3.4.2	FET 放大电路的三种基本放大组态	(103)
3.4.3	FET 放大电路的交流分析	(104)
3.4.4	FET 三种放大组态的比较	(108)
3.5	FET 其他基本电路	(108)
3.5.1	恒流源电路	(108)
3.5.2	有源负载	(109)
3.5.3	微电流模拟开关	(109)
小结		(111)
自学选读资料		(112)
第一部分	结型场效应管的工作原理	(112)
第二部分	其他常用半导体器件	(114)
思考题与习题		(117)
EWB 仿真习题		(119)
第 4 章	集成运算放大器	(120)
4.1	集成运算放大器的基本组成	(120)
4.2	集成电流源电路	(121)
4.2.1	镜像电流源	(121)
4.2.2	比例电流源	(122)
4.2.3	微电流源	(123)
4.2.4	集成有源负载放大电路	(124)
4.3	差动放大电路	(125)
4.3.1	直接耦合放大电路的零点漂移问题	(125)
4.3.2	差动放大电路的工作原理与性能分析	(126)
4.3.3	具有电流源的差动放大电路	(131)
4.4	集成运放的输出级电路	(132)
4.5	集成运算放大器	(134)
4.5.1	集成运放 F007 内部电路的定性分析	(134)
4.5.2	F007 电路仿真分析	(135)
4.5.3	专用型集成运放简介	(136)
4.5.4	集成运放的电路符号与简化电路模型	(136)

4.6	MOS 集成运算放大器	(137)
4.6.1	MOS 镜像电流源	(137)
4.6.2	MOS 差动放大电路	(138)
4.6.3	MOS 源级输出器	(138)
4.6.4	MOS 集成运放 5G14573 简介	(138)
4.7	集成运算放大器的主要性能指标	(139)
	小结	(142)
	自学选读资料	(142)
	宽带跨导放大器	(142)
	思考题与习题	(145)
	EWB 仿真习题	(149)
第 5 章	负反馈与集成运放的线性应用	(150)
5.1	集成运放的电压传输特性	(150)
5.1.1	集成运放的电压传输特性	(150)
5.1.2	集成运放的线性工作范围	(150)
5.2	反馈概念与反馈方程式	(152)
5.2.1	反馈的基本概念	(152)
5.2.2	反馈方程式	(158)
5.3	负反馈对放大器性能的影响	(160)
5.3.1	负反馈使放大倍数稳定性提高	(160)
5.3.2	负反馈使放大器通频带展宽	(161)
5.3.3	负反馈使输入线性范围扩大,非线性失真减小	(161)
5.3.4	负反馈能够改善放大器的输入电阻和输出电阻	(162)
5.3.5	放大电路中引入负反馈的基本原则	(163)
5.4	负反馈放大器的近似估算分析与设计	(165)
5.4.1	负反馈放大器分析方法概述	(165)
5.4.2	深度负反馈条件下电压增益的近似估算	(165)
5.4.3	深度负反馈放大器的设计举例	(169)
5.4.4	设计举例	(170)
5.5	集成运放基本运算电路	(172)
5.5.1	集成运放工作状态的基本判据与应用概述	(172)
5.5.2	集成运放基本运算电路	(172)
5.6	集成运放线性工作状态下构成的非线性应用电路	(182)
5.6.1	反相对数运算	(182)
5.6.2	反对数(指数)运算电路	(183)
5.6.3	绝对值电路	(184)
5.6.4	最大值选择(峰值检波)电路	(185)
5.7	集成运放有源滤波器	(186)
5.7.1	RC 有源滤波器的基本类型	(187)

5.7.2	集成运放作为有限增益放大器的有源滤波器	(188)
5.7.3	运放作为无限增益放大器的多重反馈有源滤波器	(190)
5.7.4	有源带阻滤波器	(193)
5.8	集成运放应用中的几个实际问题	(195)
5.8.1	集成运放的选择	(195)
5.8.2	集成运放的参数测量	(196)
5.8.3	集成运放使用时可能出现的异常现象	(199)
	小结	(202)
	自学选读资料	(204)
	第一部分 负反馈放大电路的框图分析法	(204)
	第二部分 集成运放非理想参数对电路性能的影响	(208)
	思考题与习题	(211)
	EWB 仿真习题	(223)
第6章	信号发生电路	(224)
6.1	正弦振荡电路的一般组成	(224)
6.1.1	自激振荡条件	(225)
6.1.2	正弦振荡电路的一般组成	(226)
6.1.3	振荡的建立与稳幅过程	(227)
6.2	RC 正弦振荡电路	(228)
6.2.1	RC 串-并联正弦振荡电路	(228)
6.2.2	RC 移相式正弦振荡电路	(234)
6.2.3	全通相移 RC 振荡电路	(237)
6.3	LC 正弦振荡电路	(239)
6.3.1	LC 振荡回路的选频特性	(239)
6.3.2	变压器反馈式 LC 正弦振荡电路	(243)
6.3.3	LC 三点式正弦振荡电路	(246)
6.3.4	石英晶体振荡电路	(247)
6.4	方波-三角波发生电路	(251)
6.4.1	方波发生电路的一般组成	(251)
6.4.2	集成运放的开环应用——比较器	(253)
6.4.3	方波-三角波发生电路	(258)
6.4.4	矩形波-锯齿波发生器	(260)
6.5	集成电压比较器与集成函数发生器	(261)
6.5.1	集成电压比较器	(261)
6.5.2	集成函数发生器 8038 简介	(262)
	小结	(265)
	自学选读资料	(266)
	集成定时器 555	(266)
	思考题与习题	(270)

第 7 章 功率电路	(277)
7.1 功率放大电路概述	(277)
7.1.1 功率放大电路与电压放大电路的主要区别	(277)
7.1.2 功率放大电路的分类	(278)
7.2 互补对称功率放大电路	(279)
7.2.1 甲类共射放大电路的输出功率与效率	(279)
7.2.2 乙类互补对称功放的图解分析	(281)
7.2.3 管耗功率与功率管的选用原则	(282)
7.2.4 甲乙类互补对称功率放大电路	(283)
7.3 集成功率放大电路	(286)
7.3.1 集成功率放大器 LM380	(286)
7.3.2 功率放大器 PA12	(290)
7.3.3 桥式功率放大电路	(291)
7.4 单相整流与滤波电路	(292)
7.4.1 单相整流电路	(292)
7.4.2 整流滤波电路	(294)
7.4.3 桥式整流与电容滤波电路的设计	(295)
7.5 串联型连续调节稳压电路	(296)
7.5.1 稳压概念及其主要技术指标	(296)
7.5.2 串联型连续调节稳压电路	(298)
7.5.3 集成三端稳压器	(301)
7.6 开关型稳压电源	(302)
7.6.1 开关型稳压电源的组成和基本工作原理	(302)
7.6.2 实用开关稳压电源电路简介	(304)
7.7 功率器件	(306)
7.7.1 双极型大功率三极管	(306)
7.7.2 功率 MOS 器件	(310)
7.7.3 功率模块	(311)
7.7.4 晶闸管	(313)
小结	(316)
思考题与习题	(317)
第 8 章 模拟电路的计算机仿真教学	(321)
8.1 EWB 仿真软件的使用方法	(321)
8.1.1 EWB 简介	(321)
8.1.2 EWB 的主窗口	(322)
8.1.3 应用举例	(323)
8.2 模拟电路 EWB 仿真演示	(329)
8.2.1 BJT 的电流分配关系及电流控制作用	(329)
8.2.2 简化的 BJT 非线性模型仿真	(331)

8.2.3	BJT 的电压传输特性仿真	(333)
8.2.4	放大电路的饱和失真与截止失真	(334)
8.2.5	耦合电容的“通交隔直”作用	(336)
8.2.6	单级共射放大电路的频率特性	(337)
8.2.7	FET 的转移电导特性和电压传输特性	(338)
8.2.8	集成电流源和有源负载放大电路	(340)
8.2.9	差动放大电路	(341)
8.2.10	BJT 高频混合 π 模型与密勒近似模型的比较	(342)
8.2.11	乙类互补对称输出电路的交越失真	(344)
8.2.12	跨导放大器“共基”放大与电压传输特性	(345)
8.2.13	集成运放 F007 内部电路仿真	(346)
8.2.14	集成运放 LM741 的电压传输特性与开环频率特性	(347)
8.2.15	多级直耦放大器仿真测量	(348)
8.2.16	CMOS 跨导运算放大器(OTA)	(349)
8.2.17	RC 电路不失真传输条件	(350)
8.2.18	负反馈能够扩展放大器的通频带	(352)
8.2.19	集成运放 741 的开环与闭环幅频特性的比较	(353)
8.2.20	负反馈放大器方块图分析法的验证	(354)
8.2.21	负反馈放大器高频自激问题的研究	(355)
8.2.22	无限增益多重反馈二阶低通滤波器	(357)
8.2.23	LC 谐振回路与 LC 正弦振荡电路的起振过程	(358)
8.2.24	RC 串 - 并联正弦振荡电路	(359)
8.2.25	方波 - 三角波发生器	(360)
8.2.26	OTL 功率放大器中自举电路的作用	(362)
8.2.27	模拟电感	(363)
8.2.28	微分方程的电路模拟	(364)
	自学选读资料	(366)
	参考文献	(382)

第 1 章 半导体二极管及其电路分析

二极管是一种最简单的半导体器件，在电子电路中有着广泛的应用。本章在扼要介绍半导体基本知识之后，重点讨论 PN 结及其非线性伏 - 安特性。PN 结是构成结型半导体器件的基础，故在学习普通二极管及硅稳压二极管的伏 - 安特性和主要参数之后，本章将重点介绍二极管电子电路的基本分析方法和应用实例。半导体导电的共价键理论列为本章自学选读资料。

1.1 PN 结及其非线性伏 - 安特性

1.1.1 本征半导体

按导电性能的不同，物质可分为导体、绝缘体和半导体。目前制造半导体器件的典型半导体材料有硅 (Si)、锗 (Ge) 和砷化镓 (GaAs) 等。

纯净的单晶半导体称为本征半导体。本征半导体的导电性质与金属导体相比，具有如下特点：

① 热敏性质。温度升高时，其电阻率迅速下降，利用本征半导体的热敏性质，可以制造热敏元件，如热敏电阻和温度传感器等。

② 光敏性质。当一定强度的光照射在本征半导体的表面时，电阻率显著下降。利用这个特性，可以制造光敏元件（如光敏电阻）。

③ 掺杂性质。在本征半导体中掺入微量的特定杂质元素可制成杂质半导体，其电阻率显著下降，导电能力增强。根据这种性质而产生的掺杂工艺可以制造各种半导体器件。

1.1.2 杂质半导体

利用半导体掺杂工艺，在本征半导体中掺入某种杂质元素，可以形成杂质半导体（或称掺杂半导体）。根据掺入杂质元素的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1.1.2.1 N 型半导体

在本征硅（或锗）中，掺入微量的 5 价元素（如磷、砷、锑等）可形成主要靠自由电子导电的杂质半导体，称为电子型半导体。由于电子呈负电性，取英文 Negative 的字头为名，故又称为 N 型半导体。

1.1.2.2 P 型半导体

在本征硅（或锗）中，掺入微量的 3 价元素（如硼、铝、镓等）可形成主要靠空穴导电的杂质半导体，称为空穴型半导体。所谓空穴，是指当本征硅（或锗）原子失去一个价电子时，该原子将变为正离子，相当于一个单位正电荷。在晶体中，正离子本身是不会移动的；但是在外电场的作用下，其他硅原子的价电子转移并将正离子复合，即相当于

单位正电荷转移了，我们把这个能够转移单位正电荷的载流子称为“空穴”，即空穴也可以导电。由于空穴呈正电性，取 Positive 的字头为名。所以，将空穴型半导体称为 P 型半导体^[注]。

1.1.3 PN 结

将一块本征硅（或锗）片，通过掺杂工艺（高温扩散）形成 P 型与 N 型半导体的结合体，称为 PN 结。其示意图如图 1-1 所示。

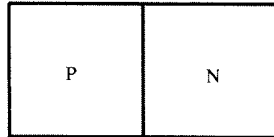


图 1-1 PN 结示意图

1.1.3.1 PN 结的单向导电性

理论与实践证明，当 PN 结外加不同极性的电压时，将呈现截然不同的导电性能，简称为 PN 结的单向导电性。

1. 正偏结——正向导通

当外接电源使 P 区电位高于 N 区电位时，称为 PN 结正向偏置（简称正偏）。此时，该 PN 结称为正偏结。正偏结呈低阻性质，PN 结电阻很小，电流较大，称为 PN 结“正向导通”。PN 结正向导通时，正向导通电压降只有零点几伏。

2. 反偏结——反向截止

当外接电源使 P 区电位低于 N 区电位时，称 PN 结为反向偏置（简称反偏）。此时，该 PN 结称为反偏结。反偏结呈高阻性质，PN 结电阻很大，电流甚微，称为 PN 结“反向截止”。

如果只定性了解 PN 结具有“正向导通，反向截止”的单向导电性质是不够的。PN 结单向导电性质是对 PN 结的一种粗略的定性描述。PN 结具有非线性的伏 - 安特性。PN 结的电流方程是 PN 结非线性伏 - 安特性的定量描述。

1.1.3.2 PN 结的电流方程

理论分析证明，典型的 PN 结在如图 1-2 所示的关联参考方向下的电压 - 电流关系数学表达式为：

$$i = I_S(e^{u/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中， I_S 为反向饱和电流，其大小与 PN 结的材料、制造工艺、温度有关； U_T 称为温度电压当量，当热力学温度 $T = 300 \text{ K}$ （即 27°C ）时， $U_T \approx 26 \text{ mV}$ （此数据本书常用到）。

[注] P 型半导体与 N 型半导体的区别在于导电粒子（称为载流子）的电性质不同，相同材料、同样的载流子浓度，N 型半导体的电导率高于 P 型半导体的电导率。值得注意的是，不要认为 P 型半导体带正电，N 型半导体带负电。实际上，它们都是电中性的，详见本章自学选读资料。

很明显，当加在 PN 结上的电压 $u = 0$ （零偏）时，流过 PN 结的电流 $i = 0$ 。

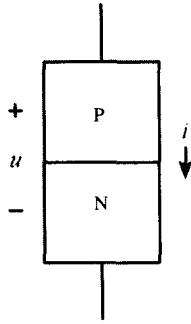


图 1-2 PN 结的关联参考方向

当正向电压 u 大于 U_T 几倍以上时， $e^{u/U_T} \gg 1$ 成立，则 $I \approx I_S e^{u/U_T}$ ，表明 PN 结的正向伏-安特性呈指数规律变化，如图 1-3 所示。

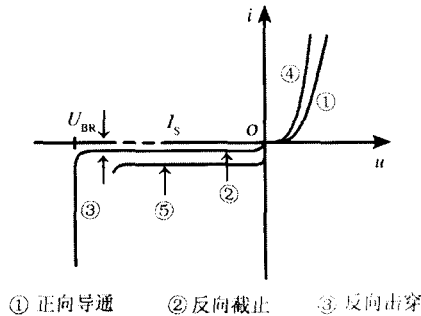


图 1-3 PN 结非线性伏-安特性

当反向电压 $|u|$ 大于 U_T 几倍以上，使 $e^{u/U_T} \ll 1$ 成立时，则 $i \approx -I_S$ ，其中，负号表示电流实际方向与电流参考方向相反。

应当指出，PN 结的电流方程式 (1-1) 只适用于 PN 结正向导通和反向截止两个工作区，即如图 1-3 所示中的①、②两个区域。

1.1.3.3 PN 结的反向击穿特性

可以设想，PN 结反偏电压很大时，是否一定还是反向截止呢？答案是否定的。这就是说，“反偏结——反向截止”这个结论是有条件限制的。当反向电压的绝对值 $|u|$ 增大到某一值（如图 1-3 所示中的 U_{BR} ）时，再继续增大 $|u|$ ，反向电流将急剧增大（如图 1-3 所示中的③段），这种现象称为 PN 结的反向击穿。PN 结伏-安特性的反向击穿区具有恒压特性，即反向（击穿）电流在规定范围内变化时，PN 结上的反向电压变化很小。硅稳压二极管就是利用 PN 结的反向击穿特性实现稳压的。

应该指出，当击穿时的反向电流未超过 PN 结最大击穿电流（它取决于允许的最高结温）时，减小反向电压，PN 结的性能能够恢复正常。这种击穿称为 PN 结的电击穿；若反向击穿电流超过 PN 结允许的最大反向电流时，减小反向电压，PN 结性能不能恢复。这种击穿被称为热击穿。为防止 PN 结的热击穿，PN 结必须串联一个适当阻值的限流

(或降压)电阻,以限制流过PN结的反向击穿电流过大。

欲进一步了解PN结反向击穿的机理,有兴趣的同学,可阅读本章自学选读资料第一部分(半导体的共价键理论)以进一步了解PN结反向击穿的机理。

1.1.3.4 PN结的温度特性

PN结的特性随温度变化很敏感。温度升高时,正向特性左移,反向特性下移(如图1-3所示中的④、⑤线段)。其典型数据如下:温度每升高1℃,在保持正向电流不变的条件下,PN结(所需)的正向压降减小约2mV;温度每升高10℃,反向饱和电流 I_s 约增大1倍。PN结最高允许结温与材料有关,硅材料为150℃~200℃,锗材料为75℃~100℃。

虽然PN结的温度特性使PN结工作时的热稳定性变差,给结型器件的应用带来不便,但利用PN结的温度特性制作热敏器件(温度传感器)和热补偿器件,却广泛应用于电子测量与自动控制系统中。

1.1.3.5 PN结的电容效应

理论与实践证明,PN结具有电荷存储效应。PN结一侧存储电荷 Q 与PN结位垒电压 U_H 之比,称为PN结的静态电容,即 $C_j = Q/U_H$ 。PN结电容具有非线性特性,与PN结位垒电压的大小有关。

在给定偏置电压的条件下,PN结一侧存储电荷的变化量 ΔQ 与PN结位垒电压 U_H 的变化量 ΔU_H 之比称为PN结的动态电容 C_j ,即

$$C_j = \frac{\Delta Q}{\Delta U_H} \tag{1-2}$$

PN结动态电容随着PN结的偏置不同而改变。在高频情况下,PN结电容的存在使PN结由非线性电阻特性变为非线性的阻容特性。利用PN结电容随PN结位垒电压变化的性质,可以制成变容二极管,作为高频情况下的频率自动控制元件。

有关PN结电容的概念,请阅读本章自学选读资料第一部分(半导体的共价键理论)做进一步的了解。

1.2 半导体二极管的特性曲线及主要参数

半导体二极管原理性结构是“一结两端”,即在PN结上引出两个电极引线,如图1-4所示。与P区相连的引线称为正极(或阳极),与N区相连的引线称为负极(或阴极)。

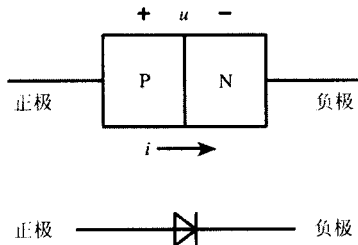


图1-4 二极管原理性结构及电路符号

半导体二极管的种类很多,如普通二极管、稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等。其中,利用PN结单向导电特性的普通二极管和利用PN结反向击穿特性

的硅稳压二极管应用最广。本节主要介绍这两种二极管的伏-安特性曲线及主要参数。

1.2.1 普通二极管的伏-安特性曲线

典型普通二极管的伏-安特性曲线如图 1-5 所示。二极管的伏-安特性与 PN 结的伏-安特性略有差异。因为实际的二极管除 PN 结之外,还有引线与杂质半导体之间的接触电阻、P 区或 N 区的半导体(材料)体电阻及封装表面的漏电阻。实际的二极管伏-安特性具有如下特点。

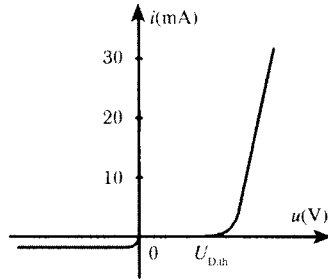


图 1-5 二极管伏-安特性曲线

1.2.1.1 正向特性

1. 死区电压

二极管所加的正向电压只有超过某一值时,才能有明显的正向电流。这个电压值称为二极管阈值电压或死区电压,用 $U_{D,th}$ 表示,如图 1-5 所示。在室温时,硅二极管的 $U_{D,th}$ 约为 $0.5 \sim 0.6V$,锗二极管的 $U_{D,th}$ 约为 $0.1 \sim 0.2V$ 。

2. 变化规律

在小电流时,正向特性呈现出指数规律变化;当电流较大时,近似于直线特性。因为大电流时,引线接触电阻和 P 区、N 区半导体体电阻与 PN 结电阻相比,前者占据主要部分。

3. 正向压降

小功率二极管的正向压降变化范围比较小,锗二极管约为 $0.2 \sim 0.3V$,硅二极管约为 $0.6 \sim 0.7V$ 。因此,如果不能将直流电源电压事先调到零点几伏,则绝对不能将较大的直流电源电压直接加在正向二极管上,而必须串入限流(或降压)电阻。

1.2.1.2 反向特性

由于管子表面漏电流的存在,故二极管的反向电流大于 PN 结的反向饱和电流 I_S 。对于小功率二极管而言,反向电流仍然很小。硅管一般小于 $0.1\mu A$,锗管小于几十微安。

1.2.2 普通二极管的主要参数

电子器件的性能参数是定量描述器件性能质量和安全使用的参考数据,是评价选用器件的基本依据。器件的性能参数在一般器件手册中可以查到或通过直接测量得到,下面介绍二极管的主要参数及其含义。

1.2.2.1 直流电阻 R_D

由二极管的伏-安特性可以看出,二极管属于非线性电阻器件,即二极管所呈现的电