

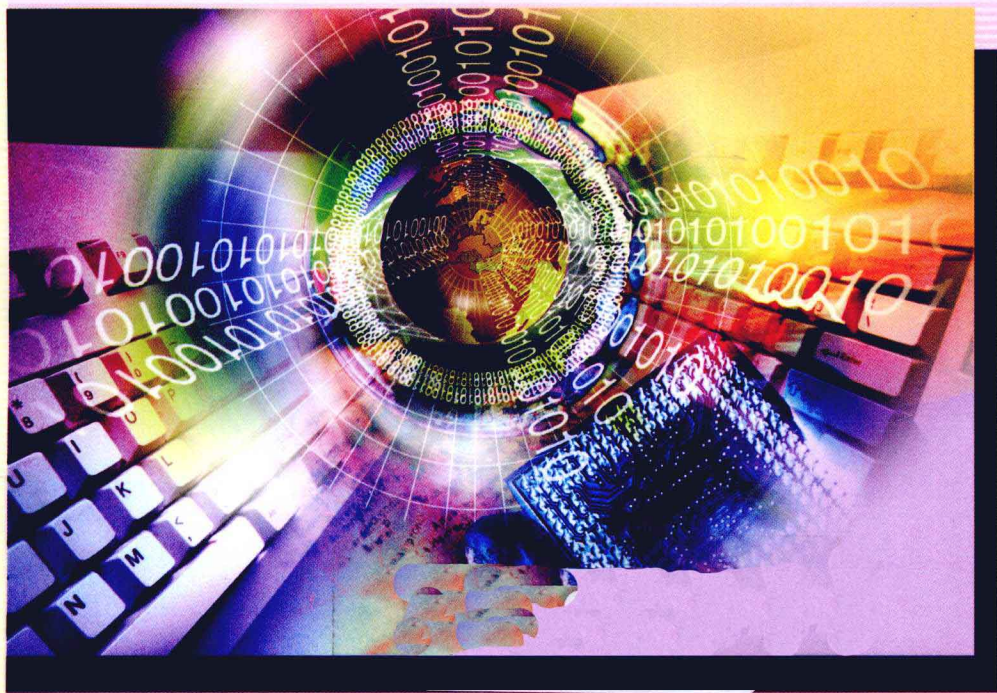


新世纪电子信息平台课程系列教材

模拟电子技术基础

陈艳峰 主编

MONI DIANZI JISHU JICHU



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新世纪电子信息平台课程系列教材

模拟电子技术基础

主 编 陈艳峰
副主编 晋建秀
参 编 靳贵平 刘娇蛟 吕念玲



机械工业出版社

本书共分 11 章，主要内容包括：半导体二极管及其应用；晶体三极管及放大电路基础；场效应晶体管及其放大电路；多级及组合放大电路；集成运算放大器单元电路；放大电路的频率响应；负反馈放大电路；集成运算放大器应用电路；振荡电路；直流电源；模拟电子电路的计算机辅助分析与仿真。

本书重点突出，注重基本电路的分析与设计方法，书中例题典型，每章均有内容提要及小结，并配有适量的习题，书后附有部分习题答案，便于自学。

本书可作为高等院校电气、电子信息类专业模拟电子技术课程的本科教材，也可作为从事电子技术工作的工程技术人员及电子技术爱好者的参考书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/陈艳峰主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 8
ISBN 978 - 7 - 111 - 34464 - 3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 131929 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 王小东

版式设计: 霍永明 责任校对: 胡艳萍

责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22 印张 · 544 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 34464 - 3

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

新世纪电子信息平台课程系列教材 编 委 会

主任委员	徐向民			
副主任委员	殷瑞祥	贡克勤		
委 员	褚庆昕	冯穗力	傅予力	金连文
	林土胜	陆以勤	丘水生	尹俊勋

本书常用符号说明

1. 电流和电压符号的规定 [以晶体管基极 (b) 电流为例]

- I_B 大写字母、大写下标, 表示直流 (或平均) 量
- i_b 小写字母、小写下标, 表示交流瞬时值
- i_B 小写字母、大写下标, 表示交、直流量的瞬时总值
- I_b 大写字母、小写下标, 表示交流的有效值
- $\Delta i_B (\Delta I_B)$ 表示瞬时值 (直流分量) 的变化量

2. 基本符号

- A 集成运算器件
- \dot{A} 放大倍数或增益的通用符号
- \dot{A}_f 反馈放大电路的闭环增益
- \dot{A}_u 电压增益通用符号
- \dot{A}_r 互阻增益
- $\dot{A}_{ii} \dot{A}_i$ 电流增益
- \dot{A}_g 互导增益
- \dot{A}_{uc} 共模电压增益
- \dot{A}_{ud} 差模电压增益
- \dot{A}_{uh} 高频电压增益
- \dot{A}_{ul} 低频电压增益
- \dot{A}_{um} 中频电压增益
- \dot{A}_{us} 考虑信号源内阻时的电压增益, $\dot{A}_{us} = \dot{U}_o / \dot{U}_s$
- \dot{A}_{uu} 电压增益, 第一个下标为输出量, 第二个下标为输入量, $\dot{A}_{uu} = \dot{u}_o / \dot{u}_i$ 、 \dot{A}_{ui} 、 \dot{A}_{ii} 、 \dot{A}_{iu} , 以此类推
- b 双极型晶体管的基极
- BW 频谱宽度, 带宽
- BW_G 单位增益带宽
- c 双极型晶体管的集电极
- C 电容通用符号
- C_b 隔直电容 (耦合电容)
- C_e 发射极旁路电容
- C_D 扩散电容
- C_T 势垒电容
- C_J 结电容
- C_μ 基极—集电极电容
- C_π 基极—发射极电容
- d 场效应管的漏极
- D 非线性失真系数
- e 双极型晶体管的发射极, 自然对数的底
- \dot{F} 反馈系数通用符号
- \dot{F}_{uu} 第一个下标为反馈量, 第二个下标为输出量, $\dot{F}_{uu} = \dot{U}_f / \dot{U}_o$, \dot{F}_{ui} 、 \dot{F}_{ii} 、 \dot{F}_{iu} , 以此类推
- f 频率通用符号
- f_{bw} 通频带
- f_c 滤波电路的特征频率, 幅度交界频率 (放大电路增益为 0dB 时的信号频率)
- f_0 电路的振荡频率、中心频率, 相位交界频率 ($\Delta\varphi_{AF} = \pm\pi$ 所对应的信号频率)
- f_H 放大电路的上限截止频率
- f_L 放大电路的下限截止频率
- f_M 二极管的最高工作频率
- f_T 特征频率
- f_α 晶体管共基截止频率
- f_β 晶体管共射截止频率
- G 电导通用符号
- G_m 负反馈放大电路的幅度裕度
- g 场效应晶体管的栅极
- g 微变电导
- g_m 跨导
- I、i 电流的通用符号
- I_D 二极管的电流
- I_F 二极管的最大整流平均电流
- I_R 二极管的反向电流
- I_S 二极管的反向饱和电流
- I_{CBO} 发射极开路时 b-c 间的反向电流
- I_{CEO} 基极开路时 c-e 间的穿透电流
- I_{CM} 集电极最大允许电流

I_{DO} 增强型 MOS 管 $U_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的漏极电流

I_{DSS} 耗尽型和结型场效应管 $U_{GS} = 0$ 时的漏极电流

I_{IB} 输入偏置电流

I_{IO} 输入失调电流

\dot{i}_s 信号源电流

\dot{i}_i 输入电流

\dot{i}_o 输出电流

\dot{i}_f 反馈电流

I_Q 电流静态值

i_P 集成运放同相输入端的电流

i_N 集成运放反相输入端的电流

K 热力学温度的单位

k 玻尔兹曼常数

K_{CMR} 共模抑制比

L 电感通用符号

M 互感系数

N 电子型半导体

N_F 噪声系数

P 空穴型半导体

P 功率通用符号

p 瞬时功率

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

P_o 输出交流功率

P_{om} 最大输出交流功率

P_T 晶体管耗散功率

P_V 电源消耗功率

Q 静态工作点

R 电阻通用符号 (直流电阻或静态电阻)

r 交流电阻或动态电阻

R_b 、 R_e 、 R_c 晶体管的基极电阻、集电极电阻、发射极电阻

R_g 、 R_d 、 R_s 场效应晶体管的栅极电阻、漏极电阻、源极电阻

R_i 、 R_{if} 放大电路的输入电阻、负反馈放大电路的输入电阻

R_o 、 R_{of} 放大电路的输出电阻、负反馈放大电路的输出电阻

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

R_f 反馈电阻

RP 电位器

r_d 二极管导通时的动态电阻

r_z 稳压管工作在稳压状态下的动态电阻

$r_{bb'}$ 晶体管基区体电阻

$r_{b'e}$ 晶体管发射结的动态电阻

r_{ds} 场效应晶体管 d-s 间的动态电阻

r_{id} 差模输入电阻

SR 转换速率

S 整流电路的脉动系数

S_V 稳压电路的电压调整率

S_r 稳压电路的稳压系数

T 温度、周期

U_Q 电压静态值

\dot{U}_f 反馈电压

\dot{U}_s 交流信号源电压

u_{ic} 共模输入电压

u_{id} 差模输入电压

u_P 集成运放同相输入端的电压

u_N 集成运放反相输入端的电压

U_T 温度的电压当量、电压比较器的阈值电压

U_{OH} 、 U_{OL} 电压比较器的输出高电平、低电平

U_{CES} 晶体管饱和压降

$U_{GS(off)}$ 耗尽型场效应晶体管的夹断电压

$U_{GS(th)}$ 增强型场效应晶体管的开启电压

$U_{D(th)}$ 二极管的开启电压

U_R 、 $U_{(BR)}$ 二极管的反向电压、击穿电压

$U_{(BR)CBO}$ 发射极开路时 b-c 间的击穿电压

$U_{(BR)CEO}$ 基极开路时 c-e 间的击穿电压

V_{BB} 基极回路电源

V_{CC} 集电极回路电源

V_{EE} 发射极回路电源

V_{DD} 漏极回路电源

V_{SS} 源极回路电源

VD 二极管

V 晶体管, 场效应晶体管

VS 稳压管

α 晶体管共基接法的电流放大系数

β 晶体管共射接法的电流放大系数

η 效率

φ 相角

ϕ_m 负反馈放大电路的相位裕度

τ 时间常数

ω 角频率通用符号

前 言

本书是根据教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员新修订的《电子线路(I)课程教学基本要求》，并考虑我国高等学校的课程设置和学时压缩的教学现状，结合作者多年的教学实践而编写的。

模拟电子技术课程是高等工科院校电类专业的重要基础课之一，是一门实践性与实用性很强的课程。其主要内容包括半导体二极管、晶体三极管(BJT)、场效应晶体管(FET)和集成运算放大器的工作原理、特性与参数，以及由它们所构成的各种放大电路和振荡电路的组成、工作原理、性能特点、电路的基本分析方法、工程计算方法和设计方法。在内容安排上，既不能削弱传统的基本理论和要求，又必须融入近年来电子技术新成果，因此，本着“保证基础，精选内容，联系实际，利于自学”的原则，尽量做到思路清晰，强化基本概念，突出电路设计方法，以达到引导学生思考、培养其创新思维的目的。

本教材在内容选择和编排上具有以下特点：

1. 突出基本内容，注重基本分析方法

本书以分立元件电路为基础，以集成电路为重点，加强了模拟电子线路的基本概念、系统原理和基本方法。重点突出的“基本内容”是指学生学习本课程后所必须掌握的基本知识，且不易忘记的那些内容，是针对学生而言，而非针对专家而言。“基本分析方法”的重要性在于：它们是通用的基本理论，比具体的知识更重要，有助于理解电路的系统结构及其各部分的相互影响。“系统原理”是指系统的概念，例如系统结构(组成)、各部分的作用及其相互影响等。

2. 删繁就简，深入浅出，以分析为基础，以设计为主导

对于二极管、晶体管和场效应晶体管等器件的内部物理过程尽量从简，而强调器件的外围特性及其在实际中的应用。对于同类电路、同类内容，详述一种或两种，其他则从简。对于电路设计中所用到的模型和计算公式尽量做到简化其推导过程，而强调其工程应用。

3. 理论联系实际，便于自学

本书每章均有内容提要及小结，对每章的知识点和学习要点进行概述和总结；同时每章配有足够的典型例题，涵盖各类应用电路，并配有适量的习题，书后附有部分习题答案。注重分析方法的系统化，力争叙述简浅，便于自学。

4. 引入电子电路的计算机辅助分析与设计

为更好地体现模拟电子线路分析和设计的发展趋势，并根据当前教学上的需要，本书引入了“模拟电子电路的计算机辅助分析与仿真”一章，详细介绍了目前在电子电路的设计与仿真分析中应用广泛的软件Multisim功能、基本操作方法及其应用。结合模拟电子技术的学习，本章介绍了多种基本电路的仿真过程，并将仿真结果与理论分析进行比较，帮助读者掌握基本的电路设计思路和仿真分析方法，激发学习电子技术课程的兴趣，并加深对模拟电子线路基本理论和分析方法的理解。

本书可作为电子与通信、自动化、计算机和电力、生物医学工程等专业本科生教材，也

可作为相应专业专科生教材或教学参考书。书中内容难易程度适中，层次清楚，有利于本科教学，也不影响组织专科教学。

本书由陈艳峰拟定编写大纲并担任主编，具体执笔分工如下：第1章由吕念玲编写；第2、4、5、10章由陈艳峰编写；第3、7章由靳贵平编写；第6、11章由刘娇蛟编写；第8、9章由晋建秀编写。最后由陈艳峰修改、统稿及定稿，晋建秀负责核查书中符号、习题答案及参考文献。书中打*的为选学内容。

本书成稿后，教育部电工课程教学指导委员会委员、教育部中南地区高等学校电子电气基础课教学研究会前理事长、华南理工大学电子与信息学院丘水生教授仔细审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，对提高本书的质量帮助很大，在此表示衷心感谢！

本书编写过程还得到了华南理工大学电子与信息学院领导的关怀和师生的帮助，编者在此一并深表谢意！

感谢本教材所引参考文献的作者们。

限于编者水平，书中难免有错漏或不妥之处，恳请读者不吝指正。意见可发送邮件至 eeyfchen@scut.edu.cn。

编 者

目 录

本书常用符号说明

前言

第 1 章 半导体二极管及其应用 1

1.1 半导体的基础知识 1

1.1.1 本征半导体 1

1.1.2 杂质半导体及载流子的运动 3

1.2 PN 结的形成及其单向导电性 4

1.2.1 PN 结的形成 4

1.2.2 PN 结的单向导电性 5

1.2.3 PN 结的电容特性 6

1.3 半导体二极管 7

1.3.1 半导体二极管的结构与符号 7

1.3.2 半导体二极管的伏-安特性 8

1.3.3 半导体二极管的主要参数 9

1.3.4 半导体二极管的小信号等效电路模型 10

1.3.5 稳压管 10

1.4 半导体二极管的典型应用 11

1.4.1 二极管整流电路 11

1.4.2 二极管限幅和钳位电路 12

1.4.3 稳压管稳压电路 12

本章小结 13

习题 13

第 2 章 晶体三极管及其放大电路 16

2.1 晶体三极管 16

2.1.1 晶体三极管的结构与符号 16

2.1.2 晶体管的电流分配与放大作用 17

2.1.3 晶体管的伏-安特性曲线 20

2.1.4 晶体管的工作状态分析 22

2.1.5 晶体管的主要参数 24

2.1.6 晶体管的交流小信号等效电路模型 26

2.2 晶体管放大电路基础 31

2.2.1 放大电路的主要性能指标 32

2.2.2 放大电路的基本工作原理 35

2.3 放大电路的基本分析方法 38

2.3.1 图解法 39

2.3.2 等效电路法 45

2.4 放大电路的静态工作点的稳定 49

2.4.1 温度对静态工作点的影响 49

2.4.2 射极偏置稳定静态工作点电路分析 50

2.4.3 其他形式的稳定静态工作点电路 54

2.5 三种基本组态放大电路 56

2.5.1 共集 (CC) 基本放大电路 56

2.5.2 共基 (CB) 基本放大电路 59

2.5.3 三种基本组态放大电路性能比较 60

本章小结 62

习题 62

第 3 章 场效应晶体管及其基本放大电路 68

3.1 结型场效应晶体管 68

3.1.1 JFET 的结构和工作原理 68

3.1.2 N 沟道结型场效应晶体管的特性曲线 71

3.2 绝缘栅型场效应晶体管 73

3.2.1 增强型 MOSFET 73

3.2.2 耗尽型 MOSFET 75

3.2.3 各种 FET 的特性比较及使用注意事项 77

3.2.4 场效应晶体管的主要参数及低频小信号等效模型 78

3.3 场效应晶体管放大电路 81

3.3.1 共源放大电路 82

3.3.2 共漏放大电路 85

本章小结 88

习题 88

第 4 章 多级与组合放大电路 91

4.1 多级放大电路	91	5.6.1 集成运放的种类	150
4.1.1 多级放大电路的耦合方式	91	5.6.2 集成运放的选用	152
4.1.2 多级放大电路的分析	94	5.6.3 集成运放的使用	153
4.2 组合放大电路	98	本章小结	155
4.2.1 共射-共基组合放大电路	98	习题	156
4.2.2 共集-共射组合放大电路	99	第6章 放大电路的频率响应	162
4.2.3 共集-共基组合放大电路	100	6.1 频率响应的基本概念	162
4.3 复合管放大电路	101	6.1.1 研究频率响应的必要性	162
4.3.1 复合管构成原则	101	6.1.2 频率特性与通频带	162
4.3.2 复合管放大电路分析	103	6.1.3 增益带宽积	163
本章小结	105	6.2 频率特性的伯德图表示法	163
习题	106	6.2.1 RC 低通电路的频率特性及其伯德图	163
第5章 集成运算放大器单元电路	110	6.2.2 RC 高通电路的频率特性及其伯德图	165
5.1 集成放大电路中的电流源电路	110	6.3 单级放大电路的频率响应	166
5.1.1 基本电流源电路	110	6.3.1 BJT 高频等效电路模型	166
5.1.2 有源负载放大电路	115	6.3.2 单管共射放大电路的频率响应	170
5.2 差分放大电路	116	6.3.3 单管共源放大电路的频率响应	175
5.2.1 差分放大电路的组成及特点	116	6.4 多级放大电路的频率特性	176
5.2.2 差分放大电路的工作原理及特性分析	118	6.4.1 多级放大电路频率特性及其伯德图	176
5.2.3 差分放大电路的4种应用方式	121	6.4.2 多级放大电路的通频带	178
5.2.4 改进型差分放大电路	125	6.4.3 上、下限截止频率的估算	178
5.3 互补输出级及功率放大电路	129	* 6.5 放大电路的阶跃响应	179
5.3.1 功率放大电路的特点	130	6.5.1 单位阶跃电压和阶跃响应指标	180
5.3.2 乙类互补对称功率放大电路的分析与计算	132	6.5.2 单级放大电路的阶跃响应	181
5.3.3 甲乙类互补对称功率放大电路	137	本章小结	182
5.3.4 单电源供电的互补对称功率放大电路	140	习题	183
5.3.5 集成功率放大器	140	第7章 负反馈放大电路	185
5.4 集成运算放大器概述	142	7.1 反馈的基本概念及判断	185
5.4.1 集成运放的电路结构特点	142	7.1.1 反馈的基本概念及形式	185
5.4.2 集成运放的基本组成及电压传输特性	143	7.1.2 负反馈放大电路的框图及基本方程式	186
5.4.3 集成运算放大器的主要参数	144	7.1.3 负反馈放大电路的类型	188
5.5 典型集成运放内部电路分析	146	7.1.4 反馈放大电路的判断	190
5.5.1 简单集成运算放大器电路分析	147	7.2 负反馈对放大电路性能的影响	194
5.5.2 FO07 集成运放电路分析	148		
5.6 集成运放的选用及使用注意事项	150		



7.2.1	提高增益的稳定性	195	8.4.1	电压比较电路	233
7.2.2	扩展通频带	195	8.4.2	精密整流与绝对值电路	238
7.2.3	减少非线性失真	196	本章小结		240
7.2.4	抑制反馈环内的干扰和 噪声	197	习题		240
7.2.5	改变输入电阻和输出电阻	198	第9章 振荡电路		244
7.2.6	放大电路引入负反馈的一般 原则	200	9.1 正弦波振荡电路		244
7.3	深度负反馈放大电路闭环增益的 分析计算	201	9.1.1 正弦波振荡电路的振荡条件		244
7.3.1	深度负反馈的实质及重要 推论	201	9.1.2 正弦波振荡电路的组成和分析 方法		246
7.3.2	四种类型深度负反馈放大电路闭环 增益的估算	202	9.1.3 RC 正弦波振荡电路		247
7.4	负反馈放大电路的稳定性	206	9.1.4 LC 正弦波振荡电路		250
7.4.1	负反馈放大电路自激振荡的 原因和条件	206	9.1.5 石英晶体正弦波振荡电路		255
7.4.2	负反馈放大电路稳定性判别 的一般方法	207	9.2 非正弦信号发生电路		257
7.4.3	负反馈放大电路稳定裕度	208	9.2.1 方波与矩形波发生电路		257
* 7.4.4	相位补偿技术	209	9.2.2 三角波发生电路		261
本章小结		212	9.2.3 锯齿波发生电路		262
习题		213	本章小结		263
第8章 集成运算放大器应用 电路		217	习题		264
8.1	集成运算放大器的应用原理	217	第10章 直流电源		268
8.1.1	集成运放的电压传输特性与 工作状态	217	10.1 直流电源的组成及各部分的 作用		268
8.1.2	理想集成运放的应用特性 分析	218	10.2 整流电路		269
8.2	模拟运算电路	219	10.2.1 单相桥式整流电路		269
8.2.1	加法与减法运算电路	219	10.2.2 单相半波整流电路		271
8.2.2	积分与微分运算电路	222	10.3 滤波电路		273
8.2.3	对数与指数运算电路	224	10.3.1 电容滤波电路		273
8.2.4	乘法、除法与二次方、开方 运算电路	226	10.3.2 其他形式的滤波电路		276
8.3	有源滤波电路	229	10.4 稳压电路		278
8.3.1	滤波电路的基本概念	229	10.4.1 稳压电路的质量指标		278
8.3.2	一阶 RC 有源滤波电路	230	10.4.2 稳压管稳压电路		279
8.3.3	二阶 RC 有源滤波电路	232	10.4.3 串联型稳压电路		283
8.4	集成运放的非线性应用	233	10.4.4 集成三端稳压器及其应用		287
			10.5 开关型稳压电路		291
			10.5.1 开关型稳压电源的组成和 特点		291
			10.5.2 开关型直流稳压电路的工作 原理		293
			10.5.3 开关型稳压电路的控制 电路		299
			本章小结		301
			习题		302

第 11 章 模拟电子电路的计算机辅助

分析与仿真	306
11.1 电子电路设计与仿真分析软件	
Multisim 介绍	306
11.2 Multisim2001 的基本操作	307
11.2.1 操作界面	307
11.2.2 建立电路	308
11.3 元件库和元件编辑器	310
11.3.1 元件库	310
11.3.2 元件编辑	311
11.4 虚拟仿真仪器	313
11.4.1 仿真仪表简介	313
11.4.2 常用仿真仪表的使用	314
11.5 仿真分析法	315
11.5.1 直流工作点分析	316
11.5.2 瞬态分析	316
11.5.3 交流分析	317
11.6 Multisim 的应用及仿真分析	
实例	318
本章小结	333
部分习题答案	334
参考文献	340

第 1 章 半导体二极管及其应用

内 容 提 要

半导体器件是构成电子电路的基本元件。本章从半导体的导电特性出发,说明了半导体的两种载流子通过扩散和漂移运动、形成 PN 结的机理。进而着重讨论了半导体二极管的结构、伏-安特性、主要参数和等效电路模型,并分析了半导体二极管的几种典型应用电路。

1.1 半导体的基础知识

在自然界中,有的物质很容易导电,如铁、铝、铜等金属,我们称之为导体;有的物质不导电,如惰性气体、塑料、陶瓷、橡胶等,称为绝缘体;而有一类物质,其导电性能介于导体和绝缘体之间,我们称之为半导体。半导体电导率 σ 是 $10^{-9} \sim 10^2 \text{ S/cm}$ 量级,常用的半导体材料有硅 (Si, $\sigma \approx 10^{-5} \text{ S/cm}$)、砷化镓 (GaAs, $\sigma \approx 10^{-9} \text{ S/cm}$) 和锗 (Ge, $\sigma \approx 2.174 \text{ S/cm}$)。

物质的导电性能取决于其原子结构。导体一般为低价元素,其原子最外层电子数少于 4 个,在外电场作用下很容易产生定向移动,形成电流;绝缘体通常为高价元素(如惰性气体)或高分子物质(如橡胶)等,它们原子的最外层电子受原子核的束缚力很强,很难成为自由电子,因而导电性很差,只有在外电场强到一定程度时才可能导电。半导体原子最外层一般有 4 个价电子,它们既不像导体那么容易挣脱原子核的束缚,也不像绝缘体那样被原子核束缚得很紧,因而导电性介于二者之间。

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。半导体之所以用于制造各种电子元件,主要在于它具有如下独特的导电特性。

掺杂效应: 在本征半导体中掺入少量其他元素(称之为杂质),可以改变和控制半导体的导电能力和导电类型。利用掺杂效应可制造各种类型的半导体器件,如二极管、晶体管等;

热敏效应: 当温度变化时,半导体的导电能力会发生变化。利用热敏效应可制造热敏元件;

光电效应: 光照也可以改变半导体的导电能力,并能产生电动势。利用光电效应可制造光电晶体管、光耦合器和光电池等。

半导体的上述导电特性取决于其原子外层结构的特性。

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体的结构

本征半导体是纯净的单晶半导体。本征锗和硅均是晶体,它们是四价元素,原子的最外层电子层均有 4 个电子。锗和硅原子结构模型如图 1-1 所示。最外层的电子,通常称为价电

子。半导体的导电特性与价电子有关，为便于讨论导电机理，常采用图 1-1c 所示的简化模型。图中带 4 个单位正电荷的惯性核用于代表除价电子以外的所有电子和原子核，也就是表示除价电子外的正离子；4 个价电子分布在惯性核的周围。

在锗或硅晶体中，各原子间的距离很近，每个原子的价电子不仅受到本原子的作用，还受到相邻原子的作用。根据原子理论，原子的最外层有 8 个电子时才处于稳定状态。锗或硅的原子只有 4 个价电子，每个原子都要从四周相邻原子取得 4 个价电子才能组成稳定状态。这样，每两个相邻原子都共用一对价电子，形成共价键结构，如图 1-2 所示。

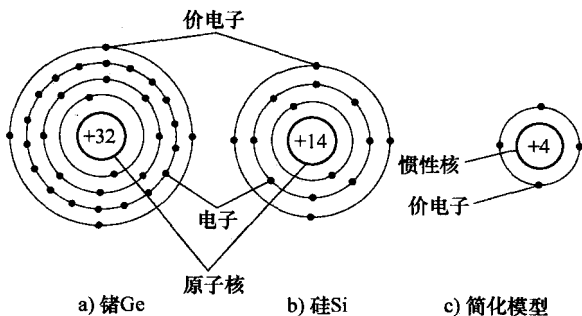


图 1-1 锗和硅原子结构模型

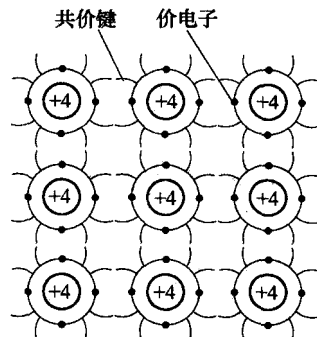


图 1-2 共价键结构示意图

2. 本征半导体中的载流子

共价键中的电子只有在获得足够能量后才能挣脱共价键的束缚，成为能够在晶格中自由运动的自由电子。在热力学温度 $T = 0\text{K}$ 且没有外界因素影响时，半导体中的价电子都被束缚在共价键中，不能自由移动，因而半导体中没有能自由运动的带电粒子——载流子。当半导体受热或光照时，某些共价键中的价电子从外界获得了足够能量而挣脱共价键的束缚，成为带一个单位负电荷的自由电子；同时，在原来的共价键中留下一个空位，称为空穴。原子因失去一个价电子而带一个单位的正电荷，或者说空穴带一个单位正电荷。半导体的这种在热激发作用下产生自由电子和空穴对的现象称为本征激发，如图 1-3 所示。

当在本征半导体两端外加一电场时，自由电子在外加电场作用下能作定向运动而形成电子电流；与此同时，由于空穴的存在，价电子在外加电场作用下按一定的方向依次填补空穴，相当于带正电荷的空穴在与价电子填补空穴运动方向相反的定向运动，形成空穴电流，因此，本征半导体中的电流是电子电流与空穴电流之和。

载流子指的是运载电荷的粒子。导体导电时只有一种载流子，即自由电子；而在本征半导体中，同时存在着带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴两种类型的载流子，它们均参与导电。值得注意的是，在半导体中自由电子导电和空穴导电的本质是不同的。自由电子导电是自由电子本身作定向运动所致，而空穴导电并非由空穴本身作定向运动所致，而是由于价电子在外加电场的作用下填补空穴，相当于空穴在与填补运动方向相反的定向运动所致。

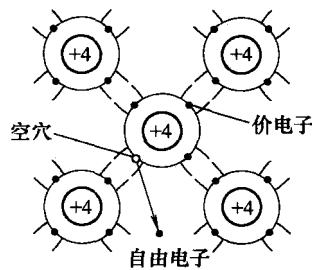


图 1-3 本征激发示意图

3. 本征半导体中载流子的浓度

本征激发产生的载流子又称为本征载流子。在本征半导体中，自由电子和空穴的数目是相等的。单位体积内本征载流子的数量称为本征载流子浓度。前已述及，本征激发使得自由电子和空穴成对出现。但同时，在本征半导体中，自由电子在运动的过程中可能与空穴相遇而填补空穴，从而使自由电子和空穴成对消失，这种现象称为复合。在一定的温度下，这两种运动达到动态平衡，从而使得本征半导体中载流子的浓度一定，并且自由电子与空穴的浓度相等。当环境温度升高时，热运动加剧，将有更多的价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子，因而半导体中载流子的浓度升高，其导电能力加强；反之，若环境温度下降，则半导体载流子浓度降低，其导电性能变差。理论分析表明，本征半导体载流子的浓度可用下式计算：

$$n_i = p_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_{g0}}{2kT}\right) \quad (1-1)$$

式中， n_i 和 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度 (cm^{-3})； T 为热力学温度 (K)； A_0 为与半导体材料有关的常数，对于硅， $A_0 = 3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-\frac{3}{2}}$ ，对于锗， $A_0 = 1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-\frac{3}{2}}$ ； E_{g0} 为热力学温度为 0K 时的禁带宽度（即破坏共价键所需要的能量）(eV)，硅的 $E_{g0} = 1.21\text{eV}$ ，锗的 $E_{g0} = 0.785\text{eV}$ ； k 为玻尔兹曼常数， $k = 8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

式 (1-1) 表明，本征载流子的浓度与半导体材料及环境温度有关。当 $T = 0\text{K}$ 时，本征载流子的浓度为 0，本征半导体为绝缘体；当温度升高时，在一定范围内，本征载流子的浓度近似按指数曲线上升，使得本征半导体的导电能力增强。

1.1.2 杂质半导体及载流子的运动

在室温下，本征载流子浓度数值虽然很大，但与其原子密度相比，却是很小的数字，因而导电能力很弱。在本征半导体中掺入少量杂质，就成为杂质半导体，其导电能力发生显著变化。根据掺入的杂质种类不同，杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两种类型。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素砷（或磷、锑），能使半导体中的自由电子浓度显著增加。由于五价元素有 5 个价电子，它在取代硅（或锗、砷化镓）原子后，其中 4 个价电子分别与相邻 4 个硅原子上的一个价电子构成共价键，多余的一个价电子不受共价键的束缚，受杂质原子的作用力亦较弱，很容易被激发成为自由电子，而失去多余电子的杂质原子变为不能移动的正离子，如图 1-4 所示。掺入的杂质原子数越多，产生的自由电子数就越多。由于五价元素杂质可以提供多余电子，故称为施主杂质。

半导体中，除施主杂质提供的大量的自由电子外，同时还存在本征激发产生的电子空穴对，但自由电子数量远大于空穴数量，故以自由电子导电为主。因此，称掺入五价元素杂质的半导体

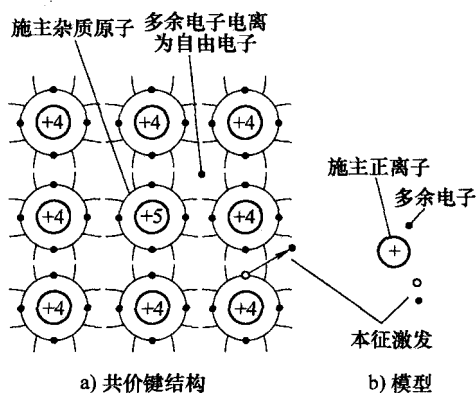


图 1-4 N 型半导体结构示意图

为电子型或N型半导体，其中，自由电子称为多数载流子，简称“多子”；空穴称为少数载流子，简称“少子”。N型半导体可以用图1-4b所示模型来表示。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素硼（或铝、镓、铟），能使半导体中的空穴浓度显著增加。由于三价元素有3个价电子，它在取代硅（或锗、砷化镓）原子后，与相邻4个硅原子上的一个价电子构成4个共价键时，缺少一个价电子，产生一个空位。在室温下，相邻原子的价电子很容易填补这个空位，从而产生一个空穴，而三价杂质原子接受一个价电子变为不能移动的负离子，如图1-5所示。掺入三价杂质原子数越多，产生的空穴数就越多。由于三价元素杂质接受价电子，故称为受主杂质。半导体中，除掺入受主杂质产生的大量的空穴外，同时还存在本征激发产生的电子空穴对，但空穴数量远大于自由电子数量，故以空穴导电为主。因此，称掺入三价元素杂质的半导体为空穴型或P型半导体，其中，空穴为多子，自由电子为少子。P型半导体可以用图1-5b所示模型来表示。

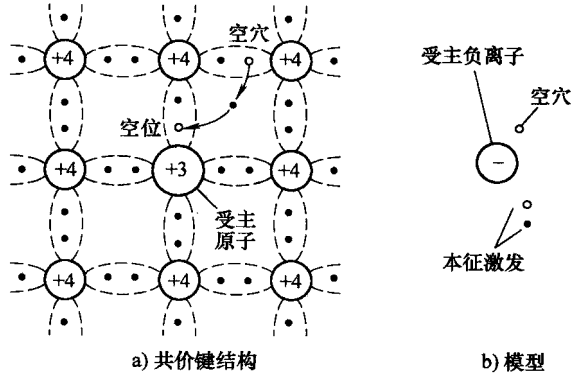


图1-5 P型半导体结构示意图

1.2 PN结的形成及其单向导电性

采用不同的掺杂工艺，将P型半导体和N型半导体制作在同一块硅片（或锗片）上，在它们的交界面便形成了PN结。PN结是半导体器件及集成电路中元器件的基本结构，其最显著的特点是单向导电性。

1.2.1 PN结的形成

半导体中的载流子有两种类型的运动：扩散运动和漂移运动。所谓扩散运动就是物质在浓度梯度的作用下从浓度高的区域向浓度低的区域运动，所形成的电流称为扩散电流；漂移运动则是在电场作用下载流子所作的定向运动，所形成的电流称为漂移电流。

由于P型半导体中空穴的浓度远大于自由电子的浓度，而N型半导体中自由电子的浓度远大于空穴的浓度，因此当把P型半导体和N型半导体制作在一起时，如图1-6所示，P区空穴浓度远大于N区空穴浓度，N区电子浓度远大于P区电子浓度。因而，在P区与N区的交界面处存在同类载流子的浓度差，形成浓度梯度，载流子作扩散运动：N区中的电子越过界面向P区扩散，并与P区的空穴复合；同时，P区的

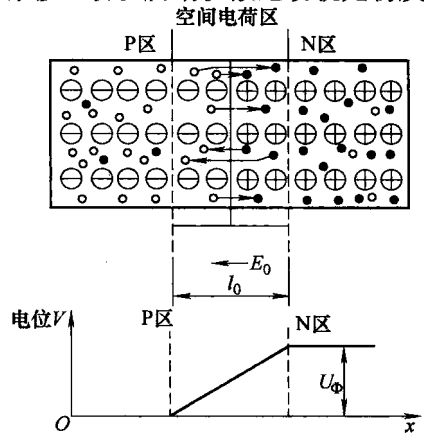


图1-6 PN结的形成

空穴也扩散到N区并与N区的电子复合。因而，在交界面附近多子浓度下降，在N区和P区分别留下正离子和负离子区。这样，由于多子的扩散运动，在P型半导体和N型半导体的交界面两侧就形成了正负离子积累区，称为空间电荷区。在此区间内，多数载流子因扩散和复合而消耗掉，浓度大大下降，近于耗尽，因此空间电荷区又称为耗尽层。在空间电荷区内正负离子的积累形成了一个方向从N区指向P区的内电场 E_0 。电场 E_0 不利于多子的扩散，将阻止P区的空穴继续向N区扩散和N区的电子继续向P区扩散，故空间电荷区又称为阻挡层或势垒区；电场 E_0 却有利于少子的漂移，将驱使N区的空穴向P区漂移，P区的电子向N区漂移，使空间电荷区内正负离子积累的数量减少。

综上所述，在P区与N区的交界面处，同时存在多子的扩散运动与少子的漂移运动。随着扩散运动的进行，空间电荷区加宽，电场增强，从而使扩散运动减弱，漂移运动随之增强，这样又反过来使空间电荷区变窄，电场削弱，再次促使多子扩散，最终将达到扩散运动和漂移运动的动态平衡。总的多子扩散电流与总的少子漂移电流大小相等，方向相反，PN结中总电流为零。而空间电荷区的宽度 l_0 为恒定值，这就是所谓的PN结。此时，电场 E_0 亦为恒定值，其方向是由N区指向P区并在PN结中产生电位差 U_0 。通常，称 U_0 为接触电位差，在室温下，硅PN结的 $U_0=0.6\sim 0.8\text{V}$ ，锗PN结的 $U_0=0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

PN结有对称结和不对称结两种类型，两种结的外部特性是相同的。由于空间电荷区内正、负电荷的电量相等，当P区与N区杂质浓度相等时，负离子区和正离子区的宽度相等，此时的PN结称为对称结；当P区与N区杂质浓度不同时，浓度高一侧的离子区宽度低于浓度低的一侧，称为不对称PN结。例如， P^+N 结是指P区多子浓度高于N区多子浓度时所形成的PN结，此时，阻挡层深入P区的宽度小于深入N区的宽度。

1.2.2 PN结的单向导电性

当在PN结的两端外加电压时将破坏PN结的动态平衡，使其扩散电流和漂移电流不再相等，此时PN结中将有电流流过。当外加电压的极性不同时，PN结将呈现截然不同的导电性能，即所谓的单向导电性。

1. PN结正偏导通

将PN结的P区接电源正极，N区接电源负极，称PN结外加正向电压或正向偏置（简称正偏），如图1-7所示。正偏时，外加电压 U 在 P^+N 结上建立的外电场 E 与内电场 E_0 方向相反，削弱内电场的作用，使得空间电荷量减少，阻挡层宽度由 l_0 减小为 l ，耗尽层两端电位差由 U_0 降为 U_0-U （忽略体电阻、电极接触电阻和引线电阻上的压降），有利于多子扩散，不利于少子漂移；此时， P^+N 结失去动态平衡，多子的扩散运动增强，而少子的漂移运动则减弱，扩散电流远大于少子的漂移电流。由于电源的作用，扩散运动将不断进行，从而在 P^+N 结中形成从 P^+ 区流向N区的数值较大的正向电流 I_F ，二极管导通。

PN结正偏时表现为一个阻值很小的电阻，当PN结外加电压 U 稍有增加时，将引起其正向电流 I_F 显著增大。值得注意的是，当PN结正向导通时，其结压降只有零点几

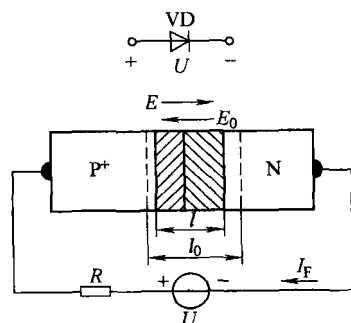


图1-7 PN结正向偏置