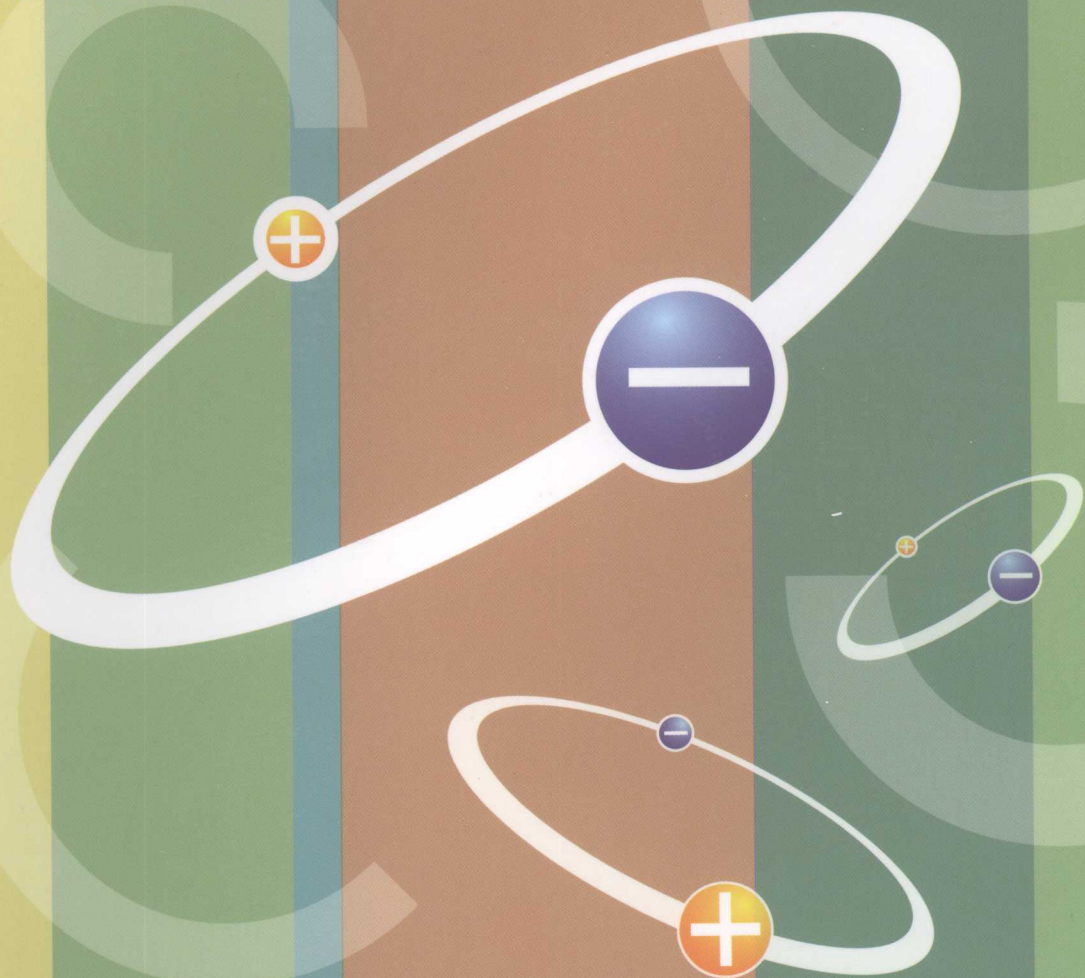


应用型本科教材



 本书配套多媒体教学课件

戈素贞 杜群羊 吴海青 等编著

模拟电子技术基础 与应用实例



北京航空航天大学出版社

应用型本科教材

模拟电子技术基础与应用实例

戈素贞 杜群羊 吴海青 等编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

为适应电子技术的飞速发展和应用型人才培养需求编写此书。本书的特点是既有一定的理论深度,又具有一定的应用实例。这些实例搭建了理论到应用的桥梁,克服了以往教材理论到实践的台阶。全书共分10章,带“*”号内容是选学内容,书中内容由浅入深,系统介绍了模拟电子技术的内容及应用,是编者多年教学经验的积累。

本书适用于应用型本科、专科电类专业模拟电子技术课程的教材,也是电子爱好者自学和实践的指导性参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础与应用实例/戈素贞等编著. —北京:
北京航空航天大学出版社, 2007. 2
ISBN 978-7-81077-960-9

I. 模… II. 戈… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—
教材 IV. TP710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020415 号

© 2007, 北京航空航天大学出版社, 版权所有。

未经本书出版者书面许可, 任何单位和个人不得以任何形式或手段复制或传播本书内容。
侵权必究。

模拟电子技术基础与应用实例

戈素贞 等编著

责任编辑 潘晓丽 张 华 刘秀清

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 22.75 字数: 510 千字

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷 印数: 5000 册

ISBN 978-7-81077-960-9 定价: 28.00 元



前言

由于“模拟电子技术”课程是电类各专业的重要专业技术基础课,编写一本既有一定的理论深度,又有一定的应用实例的书很重要。这些实例搭建了理论与应用的桥梁,克服了以往教材理论到实践的台阶,所以本书的特点是:保证基础,适度深化,注重应用,强调集成。

为了适应电子技术的飞速发展,为了适应应用型人才培养要求,为了使电子技术教材更具可读性、实用性、前瞻性,本书内容安排有10章,带“*”号内容是选学内容。第1章介绍半导体的基本知识、半导体二极管;第2章介绍双极结型三极管及放大电路基础;第3章介绍放大电路的频率响应;第4章介绍场效应三极管及其放大电路;第5章介绍集成电路运算放大器;第6章介绍反馈放大电路;第7章介绍集成放大器的应用;第8章介绍直流稳压电源;第9章是模拟电路综合应用实例;第10章是EDA技术简介。

学习本书需先修“电路原理”课程。书中用到了非正弦周期电路的求解方法,即线性电路的叠加定理;求放大电路模型时用到了戴维宁定理;求三极管的等效电路时用到了双口网络的H参数和H参数等效电路。

全书由戈素贞组织编写和统稿。其中第1章、第2章、第3章、第4章、第6章、第7章的7.1~7.4节由戈素贞编写;第7章的7.5节、第8章、第9章由杜群羊编写;第10章由吴海青编写,第5章由崔国玮编写。

由于时间仓促,能力有限,书中内容不妥之处,恳请读者不吝指出,便于我们修正提高。

在此向本书引用和参考资料的编者表示深深的感谢,向对本书出版有过帮助的所有朋友表示衷心的感谢。

作者

2006年11月

本书配套多媒体教学课件,需要的读者请访问 bhkejian@126.com。

北京航空航天大学出版社 单片机与嵌入式系统图书推荐

(2006 年 1 月后出版图书)

书 名	作 者	定 价	出 版 日期
-----	-----	-----	--------

嵌入式系统教材

嵌入式系统原理	李庆诚	估 29.0	2007.03
汇编语言程序设计——基于 ARM 体系结构	文全刚	估 31.0	2007.03
计算机组成与嵌入式系统	何为民	20.0	2007.01
Nios II 嵌入式软核 SOPC 设计原理及应用	李兰英	45.0	2006.11
SOPC 嵌入式系统基础教程	周立功	29.5	2006.11
SOPC 嵌入式系统实验教程(一)	周立功	29.0	2006.11
ARM7 嵌入式开发基础实验	刘天时	估 30.0	2006.12
ARM7 μ CLinux 开发实验与实践(含光盘)	田 泽	28.0	2006.11
ARM9 嵌入式 Linux 开发实验与实践(含光盘)	田 泽	29.5	2006.11
ARM7 嵌入式开发实验与实践(含光盘)	田 泽	29.5	2006.10
ARM9 嵌入式开发实验与实践(含光盘)	田 泽	42.0	2006.10
嵌入式系统设计与开发实验——基于 XScale 平台	石秀民	26.0	2006.10
嵌入式系统基础 μ C/OS-II 及 Linux	任 哲	35.0	2006.08
Windows CE 嵌入式系统	何宗键	32.0	2006.08
嵌入式 Intel 架构微机实验教程(含光盘)		49.0	2006.08
ARM 嵌入式 VxWorks 实践教程	李忠民	28.0	2006.03
嵌入式系统设计与应用开发	郑灵翔	36.0	2006.02
嵌入式系统设计与实践	张晓林	29.5	2006.01
ARM 嵌入式系统实验教程(三)——扩展实验	周立功	29.5	2006.02

ARM、SoC 设计、IC 设计及其他嵌入式系统综合类

ARM & Linux 嵌入式系统开发详解	锐极电子科技有限公司	估 30.0	2007.03
基于嵌入式实时操作系统的程序设计技术	周航慈	19.5	2006.11
基于 PROTEUS 的 ARM 虚拟开发技术(含光盘)	周润景	29.0	2006.12
SRT71x 系列 ARM 微控制器原理与实践	沈建华	42.0	2006.09
C++ GUI Q3 编程 (含光盘)	齐亮译	49.0	2006.08
嵌入式系统中的模拟设计	李喻奎译	32.0	2006.07
ARM 嵌入式软件开发实例(二)	周立功	53.0	2006.07
ARM 9 嵌入式 Linux 系统构建与应用	潘巨龙	29.5	2006.07
ARM SoC 设计的软硬件协同验证(含光盘)	周立功	25.0	2006.07
ARM 开发工具 ADS 原理与应用	赵星寒	29.0	2006.06
基于 FPGA 的可编程 SoC 设计	董代洁	26.0	2006.06
IAR EWARM 嵌入式系统编程与实践 (含光盘)	徐爱钧	49.0	2006.03
英汉双解嵌入式系统词典	马广云等译	59.0	2006.01
嵌入式 Ethernet 和 Internet 通信设计技术	骆丽等译	39.0	2006.01
ARM 嵌入式 Linux 系统构建与驱动开发范例	周立功	38.0	2006.02
ARM 嵌入式 MiniGUI 初步与应用开发范例	周立功	26.0	2006.01

书 名	作 者	定 价	出 版 日期
从 51 到 ARM—32 位嵌入式系统入门	赵星寒	38.0	2005.11
深入浅出 ARM7——LPC213X/214X(下)	周立功	45.0	2006.02

嵌入式操作系统及软件开发

嵌入式可配置实时操作系统 eCos 软件开发	颜若麟	39.0	2006.06
深入理解 Linux 虚拟内存管理	白洛等	76.0	2006.06
嵌入式系统接口设计与 Linux 驱动程序开发	刘 森	39.0	2006.05

DSP

dsPIC 通用数字信号控制器原理及应用——基于 dsPIC30F 系列(含光盘)	刘和平		2007.03
TMS320F2812/2810 原理及应用实例	万山明	估 26.0	2007.03
DSP 基础知识及系列芯片	曾义芳	76.0	2006.11
DSP 原理及电机控制应用——基于 TMS320LF240x 系列(含光盘)	刘和平	42.0	2006.11
DSP 原理与开发应用	支长义	36.0	2006.08
TMS320X281x DSP 原理与应用	徐科军	45.0	2006.08
dsPIC 数字信号控制器 C 程序开发及应用(含光盘)	梁海浪	36.0	2006.06
DSP 应用系统设计实践	郑 红	32.0	2006.05

单片机

教材与教辅

单片机的 C 语言应用程序设计(第 4 版)	马忠梅	29.0	2007.02
高职高专通用教材——凌阳单片机理论与实践	彭传正	22.0	2006.12
单片机认识与实践	邵贝贝	32.0	2006.08
MC68 单片机入门与实践(含光盘)	熊 慧	27.0	2006.08
标准 80C51 单片机基础教程——原理篇	李学海	29.0	2006.08
高职高专通用教材——单片机原理与应用教程	袁秀英	28.0	2006.08
高职高专通用教材——单片机实训教程	李雅轩	14.0	2006.08
高职高专通用教材——单片机习题与实验教程	李 珍	15.0	2006.08
单片机高级教程——应用与设计(第 2 版)	何立民	29.0	2007.01
单片机中级教程——原理与应用(第 2 版)	张俊谟	24.0	2006.10
单片机初级教程——单片机基础(第 2 版)	张迎新	26.0	2006.09
单片机实验与实践教程(一)(第 2 版)	万光毅	25.0	2006.06
单片机实验与实践教程(二)(第 2 版)	夏继强	26.0	2006.06
单片机实验与实践教程(三)	周立功	27.0	2006.06
练中学单片机教程	李 刚	28.0	2006.07
跟我学用单片机(第 2 版)	肖洪兵	26.0	2006.06

书 名	作 者	定 价	出 版 日期
单片机习题与试题解析	高 峰	16.0	2006.03
SoC单片机实验、实践与应用设计—— 基于 C8051F 系列(含光盘)	万光毅	39.5	2006.05

开发实例与实战

单片机控制实习与专题制作	蔡朝洋	59.0	2006.11
51 系列单片机设计实例(第 2 版) (含光盘)	楼然苗	29.5	2006.02

应用程序设计与开发

单片机 C 语言轻松入门(含光盘)	周 坚	29.0	2006.07
单片机智能化产品 C 语言设计实例 详解 (含光盘)	周兴华	28.0	2006.06
单片机 C 语言和汇编语言混合编程 实例详解(含光盘)	杜树青	26.0	2006.06

51 系列单片机其他图书

单片机轻松入门(第 2 版)(含光盘)	周 坚	28.0	2007.02
单片机应用系统电磁干扰与抗干扰 技术	王幸之	59.0	2006.01
单片机应用技术选编(11)	何立民	75.0	2006.06

PIC 单片机

单片机 C 语言编译器及其应用—— 基于 PIC18F 系列	刘和平	32.0	2007.01
PIC 单片机原理及应用(第 3 版)	李荣正	29.5	2006.10
PIC 单片机实用教程——提高篇(第 2 版)	李学海	29.5	2007.02
PIC 单片机实用教程——基础篇(第 2 版)	李学海	35.0	2007.02
PIC 单片机初级教程	李荣正	22.0	2006.03
PIC 单片机实验教程 (含光盘)	李荣正	26.0	2006.02
PIC 单片机开发应用与实验工具 制作(含光盘)	陈新建	25.0	2006.02

AVR 单片机

AVR 单片机 GCC 程序设计	佟长福	28.0	2006.01
------------------	-----	------	---------

其他公司单片机

凌阳 16 位单片机 C 语言开发(含光盘)	李晓白	35.0	2006.09
16 位单片机原理与应用	彭宣戈	25.0	2006.09
凌阳 16 位单片机开发实例	凌阳科技	19.5	2006.06
凌阳 8 位通用单片机原理及开发	凌阳科技	28.0	2006.04
凌阳 8 位单片机——提高篇(含光盘)	李学海	45.0	2006.03

总线技术

8051 单片机 USB 接口 VB 程序设计	许永和	45.0	2006.12
-------------------------	-----	------	---------

书 名	作 者	定 价	出 版 日期
EZ-USB FX2 单片机原理、编程 及应用	钱 峰	45.0	2006.03
无线单片机技术丛书——短距离无线 数据通信入门与实战(含光盘)	李文仲	30.0	2006.12

其 它

学做智能车——挑战“飞思卡尔”杯	卓 晴		2007.03
单片机与 PC 机网络通信技术	李朝青	26.0	2007.03
数字系统与逻辑设计	马金明	30.0	2007.02
应用型本科教材——模拟电子技术 基础与应用	戈素贞	29.0	2007.02
电子系统设计——基础篇	林凡强		2007.03
无线单片机技术丛书——51 单片 机与短距离无线通信	李文仲	26.0	2006.12
Q2406 无线 CPU 嵌入式技术	洪 利	25.0	2007.01
智能技术——系统设计与开发	张洪润	49.0	2007.02
自动控制原理考研试题分析与解 答技巧	张苏英	22.0	2006.12
全国大学生电子设计竞赛制作实训	黄智伟	25.0	2007.02
全国大学生电子设计竞赛技能训练	黄智伟	36.0	2007.02
全国大学生电子设计竞赛电路设计	黄智伟	33.0	2006.12
全国大学生电子设计竞赛系统设计	黄智伟	32.0	2006.12
计算机硬件类课程设计难点辅导	张 瑜	25.0	2006.08
单片机应用设计 200 例(上册)	张洪润	60.0	2006.07
单片机应用设计 200 例(下册)	张洪润	55.0	2006.07
传感器应用电路 200 例	张洪润	86.0	2006.07
基于 Proteus 的单片机可视化软 件仿真(含光盘)	林志琦	25.0	2006.09
Verilog FPGA 芯片设计	林灶生	35.0	2006.07
Cadence 高速 PCB 设计与仿真分 析(含光盘)	黄豪佑	46.0	2006.07
基于 PROTEUS 的电路与单片机 系统设计与仿真(含光盘)	周润景	45.0	2006.06
2006 年上海市嵌入式系统创新设计 竞赛获奖作品论文集	竞赛评审 委员会	27.0	2006.10
2006 第四届全国高教嵌入式系统教学研讨会 第一届全国嵌入式系统学术交流会议论文集		50.0	2006.07
2005 年 ARM 应用技术论文大奖 赛论文集	组委会	29.0	2006.05
《单片机与嵌入式系统应用》杂志 合订本(2005 年 1~12 月)		65.0	2006.06

注：表中加底纹者为 2006 年 7 月后出版的图书。

可直接向出版社邮购以上图书。邮购通信及汇款地址：北京航空航天大学出版社邮购组(邮编 100083) 另加 3 元挂号费。

邮购组电话：010-82316936，传真：010-82317031 详细图书目录及内容介绍请查阅出版社网站：<http://www.buaapress.com.cn>。

投稿单片机与嵌入式系统图书请联系：通信：北京航空航天大学出版社第 1 编辑室(邮编 100083)

电话：010-82317022 82317035 82317044 传真：010-82317022 Email: pressb@nesnet.com.cn

目 录

第1章 半导体二极管

1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体的共价键结构	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.2 PN结的形成及特性	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结的反向击穿	6
1.2.4 PN结的电容效应	7
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 半导体二极管的结构	8
1.3.2 二极管的V-I特性	9
1.3.3 二极管的主要参数	9
1.3.4 半导体分立器件型号命名方法	10
1.4 二极管基本电路分析方法	11
1.4.1 二极管正向V-I特性的建模	11
1.4.2 模型分析法应用举例	12
1.5 特殊二极管	15
1.5.1 齐纳二极管(稳压管)	15
1.5.2 变容二极管——反向运用	17
1.5.3 光电二极管	17
1.5.4 发光二极管	18
*1.6 半导体二极管应用实例	18
1.7 小 结	20
1.8 习 题	21
1.9 部分习题答案	25

第2章 双极结型三极管及放大电路

2.1	BJT 基本知识	26
2.1.1	BJT 的结构简介	26
2.1.2	BJT 放大原理	28
2.1.3	BJT 的特性曲线	31
2.1.4	BJT 的主要参数	34
2.2	共射基本放大电路	37
2.2.1	放大电路的分析方法	37
2.2.2	BJT 的小信号模型	39
2.2.3	共射基本放大电路	42
2.3	分压式共射极放大电路	48
2.3.1	放大电路的静态工作点稳定问题	48
2.3.2	分压式共射放大电路	49
2.4	共集和共基基本放大电路	52
2.4.1	共集基本放大电路	52
2.4.2	共基极基本放大电路	53
2.4.3	三种基本组态放大电路的比较	55
2.5	多级放大电路和组合放大电路	56
2.5.1	BJT 多级放大电路	56
2.5.2	BJT 组合放大电路	59
*2.6	BJT 三极管应用实例	60
2.7	小 结	63
2.8	习 题	64
2.9	答 案	70
第3章 放大电路的频率响应		
3.1	研究频率响应的意义	72
3.2	BJT 的频率参数	73
3.3	单级放大电路的高频响应	77
3.4	单级放大电路的低频响应	80
3.5	小 结	85
3.6	习 题	85
3.7	部分习题答案	87

第4章 场效应三极管及其放大电路

4.1 半导体场效应管	88
4.1.1 N沟道增强型 MOSFET	88
4.1.2 N沟道耗尽型 MOSFET	92
4.1.3 P沟道 MOSFET	93
4.1.4 结型场效应三极管(JFET)	94
4.1.5 各种 FET 特性比较	97
4.2 FET 的主要参数	99
4.3 FET 放大电路分析	100
4.3.1 FET 的交流小信号线性化模型	100
4.3.2 FET 放大电路分析	101
*4.4 FET 三极管应用实例	107
4.5 FET 与 BJT 的比较	108
4.6 小 结	109
4.7 习 题	109
4.8 部分习题答案	114

第5章 集成电路运算放大器

5.1 集成运算放大器概述	115
5.2 电流源	116
5.3 集成运放的输入级——差分放大电路	118
5.3.1 直接耦合放大电路的零点漂移现象	119
5.3.2 差分放大电路的功能	119
5.3.3 差分放大电路工作原理及分析	120
5.3.4 FET 差分放大电路	125
5.4 集成运放的中间级——电压放大电路	126
5.5 集成运放的输出级——直接耦合互补输出电路	127
5.6 通用型集成运放 BJTL741 简介	132
5.7 集成运放的主要参数	135
5.8 小 结	136
5.9 思考题与习题	137
5.10 部分习题答案	141

第6章 反馈放大电路

6.1	反馈的类型与判别方法	144
6.1.1	反馈的概念	144
6.1.2	反馈的分类	144
6.2	负反馈放大电路的四种组态	148
6.3	深度负反馈放大电路的分析方法	152
6.3.1	负反馈放大电路增益的一般表达式	152
6.3.2	深度负反馈条件下的近似计算	153
6.4	负反馈对放大电路性能的改善	155
6.4.1	提高增益的稳定性	155
6.4.2	减小非线性失真	156
6.4.3	扩展通频带	157
6.4.4	抑制环内噪声与干扰	157
6.4.5	负反馈对输入输出电阻的影响	158
6.5	负反馈放大电路的稳定问题	160
6.6	正反馈电路——正弦信号产生电路	162
6.6.1	正弦波产生的条件	162
6.6.2	RC 正弦波振荡电路	163
6.6.3	LC 正弦波振荡电路	166
6.6.4	石英晶体振荡电路	173
6.7	小 结	176
6.8	习 题	178
6.9	部分习题答案	185

第7章 集成放大器的应用

7.1	运算电路	188
7.1.1	常用运算放大器简介	188
7.1.2	基本运算电路	192
*7.1.3	实际运算放大器运算电路的误差分析	202
7.2	信号处理电路	204
7.2.1	滤波器的概念与分类	204
7.2.2	一阶低通有源滤波器	205
7.2.3	二阶有源滤波器	206

7.2.4	电压电流变化电路	210
7.2.5	采样保持电路	212
7.3	非正弦信号产生电路	212
7.3.1	电压比较器	213
7.3.2	方波发生器	218
7.3.3	三角波发生器	219
7.3.4	锯齿波发生器	220
7.4	集成运放应用中的实际问题	221
7.5	集成运放应用实例	224
7.5.1	单电源反相放大器	224
7.5.2	具有限流特性的电压-电流变换器	224
7.5.3	峰值检波器	225
7.5.4	精密电子温度测量电路	225
7.5.5	简单的电压-频率转换器	226
7.6	小 结	227
7.7	习 题	228
7.8	部分习题答案	234

第8章 直流稳压电源

8.1	小功率直流电源的组成	236
8.2	单相整流电路	237
8.2.1	单相半波整流电路	237
8.2.2	单相全波整流电路	238
8.2.3	单相桥式整流电路	239
8.2.4	整流电路的主要参数	240
8.3	滤波电路	243
8.3.1	电容滤波电路	243
8.3.2	$RC-\pi$ 型滤波电路	245
8.3.3	电感滤波电路和 LC 滤波电路	246
8.3.4	$LC-\pi$ 型滤波电路	248
8.4	硅稳压管稳压电路	248
8.4.1	稳压电路的主要指标	248
8.4.2	硅稳压管稳压电路	249
8.5	串联型直流稳压电路	250

01S	8.5.1	电路组成和工作原理	251
81S	8.5.2	输出电压的调节范围	252
81S	8.5.3	调整管的选择	252
81S	8.5.4	稳压电路的过载保护	253
81S	8.6	三端集成稳压器及其应用	254
01S	8.6.1	三端集成稳压器的组成	254
08S	8.6.2	三端集成稳压器的主要参数	255
18S	8.6.3	三端集成稳压器的应用	256
48S	8.7	开关型稳压电路	259
48S	8.7.1	开关型稳压电路的特点和分类	259
48S	8.7.2	开关型稳压电路的组成和工作原理	260
58S	8.8	小 结	262
58S	8.9	习 题	263
88S	8.10	习题答案	266

第9章 模拟电子技术应用举例

48S	9.1	函数发生器设计	268
	9.1.1	函数发生器的组成	268
	9.1.2	函数发生器设计举例	271
88S	9.2	语音放大电路设计	272
88S	9.2.1	语音放大电路原理与组成	272
88S	9.2.2	语音放大电路设计举例	274
88S	9.3	水温控制器设计	275
88S	9.3.1	水温控制器原理与组成	275
04S	9.3.2	水温控制器放大电路设计举例	279
88S	9.4	思考题	279

第10章 EDA 技术简介

81S	10.1	概 述	280
84S	10.2	PSPICE	281
84S	10.2.1	PSPICE 功能简介	281
84S	10.2.2	PSPICE 集成环境	282
04S	10.2.3	PSPICE 中有关规定	282
08S	10.2.4	绘制电路图	284

10.2.5	元器件模型.....	288
10.2.6	仿真分析.....	295
10.2.7	PSPICE 的应用实例	310
10.3	Multisim	315
10.3.1	Multisim 的特点	316
10.3.2	启 动.....	316
10.3.3	工作窗口.....	317
10.3.4	电路图的绘制.....	322
10.3.5	虚拟仪器的使用.....	325
10.3.6	仿真分析法.....	330
10.3.7	Multisim 应用实例	336
10.4	小 结.....	347
10.5	思考题与习题.....	347

参考文献

第 1 章 半导体二极管

本章主要介绍半导体的基本知识、PN 结、半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线、主要参数、基本电路、分析方法以及半导体二极管应用实例。

1.1 半导体的基本知识

物体根据导电性分成：导体、半导体、绝缘体。半导体的导电性介于导体与绝缘体之间。

电子技术中常用的半导体材料有：

元素半导体：如，硅(Si)、锗(Ge)等，其原子结构见图 1.1。最外层的 4 个电子称为价电子，它决定物体的化学性质和导电性。

化合物半导体：如，砷化镓(GaAs)等。

可掺杂或制成其他化合物半导体：如，硼(B)、磷(P)、铝(Al)等。

半导体材料的特点：

➤ 受外界光和热的刺激，导电能力显著变化。

➤ 掺杂后，其导电能力也显著变化。

这些特点是由半导体的结构决定的。所以，下面讲半导体的结构。

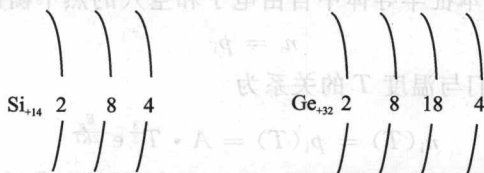


图 1.1 硅(Si)、锗(Ge)原子结构

1.1.1 半导体的共价键结构

在电子技术中用的 Si、Ge 均是晶体形式，称为单晶硅和单晶锗，也称为本征半导体。它们是由自然界中固态的硅、锗经过一个复杂的提纯过程得到的。单晶硅、单晶锗的结构是正四面

体,每个原子处于同等地位。图 1.2 和图 1.3 分别是单晶硅的立体结构图和平面示意图。

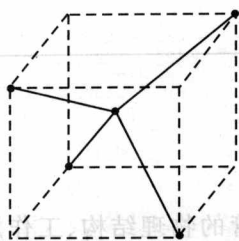


图 1.2 单晶硅的立体结构图

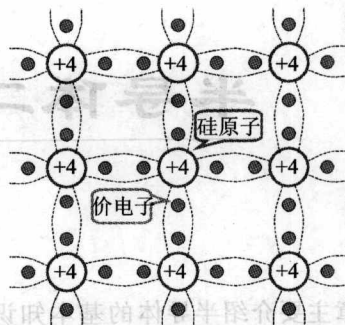


图 1.3 单晶硅的平面示意图和共价键

由于晶体内,各原子处于同等地位且各原子之间靠得很近,相邻的原子相互影响,使原来分属于每个原子的价电子成为两个原子共有,形成共价键,见图 1.3。共价键内的两个电子称为束缚电子。

共价键中的电子受两个原子核引力的约束,只有在激发时,少数电子获得一定的动能挣脱共价键的束缚成为自由电子,在原共价键中留下一个空位称空穴。在本征半导体中,自由电子与空穴是成对出现的,为空穴电子对。

电子得到足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子的现象,称为激发。

在自由电子和空穴的产生过程中,同时还存在自由电子和空穴的复合,也就是自由电子在热运动过程中和空穴相遇而释放能量,电子-空穴对消失。

可以自由运动的带电粒子称为载流子,载流子包括自由电子和空穴。空穴参与导电是半导体区别于导体的一个重要特征。

在一定温度下,本征半导体激发和复合在某一热平衡载流子浓度值上达到动态平衡。用 n_i 和 p_i 分别表示一定温度下本征半导体中自由电子和空穴的热平衡浓度,有

$$n_i = p_i \quad (1.1)$$

理论和实验均证明,它们与温度 T 的关系为

$$n_i(T) = p_i(T) = A \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2KT}} \quad (1.2)$$

式中: T 是绝对温度; K 是玻耳兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$) 或 ($1.380\,658 \pm 0.000\,012$) $\times 10^{-23} \text{ J/K}$; A 是与半导体材料、载流子有效质量以及有效能级密度有关的常量。对于硅, $A = 3.87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$; 对于锗, $A = 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$ 。 E_g 表示 $T = 0 \text{ K}$ 时破坏共价键所需的能量,又称禁带宽度,单位为 eV (电子伏)。对于硅, $E_g = 1.21 \text{ eV}$; 对于锗, $E_g = 0.785 \text{ eV}$ 。由式(1.2)可以得知在一定温度下,半导体内有一定浓度的自由电子和空穴。在半导体两侧外加电压,自由电子作定向运动,空穴也作相对运动(以后直接说空穴运动),当自由

第1章

电子和空穴的浓度足够时,就会形成电流 i 。

(1) 半导体的特性之一

在半导体中,温度 $T \uparrow \rightarrow$ 激发 $\uparrow \rightarrow$ 载流子浓度 $\uparrow \rightarrow$ 外加压不变,但电流 $\uparrow$, 即 $T \uparrow \rightarrow$ 半导体的导电性大大增强。利用该特性可制成半导体热敏元件。但该特性又造成半导体器件的温度稳定性差。

(2) 半导体的特性之二

在半导体中,光照 $\uparrow \rightarrow$ 激发 $\uparrow \rightarrow$ 载流子浓度 $\uparrow \rightarrow$ 外加压不变,但电流 $\uparrow$, 即光照 $\uparrow \rightarrow$ 半导体的导电性大大增强。利用该特性可制成半导体光敏元件。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中人为地掺入微量元素作为杂质,可使半导体的导电性发生显著变化,这是半导体的另一个特性。掺入的杂质主要是三价或五价元素,掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

1. N 型半导体(电子型半导体)

在本征半导体中掺入五价元素如磷 P_{15} 、砷 As_{33} 、锑 Sb_{51} , 掺杂后,由于磷原子周围都是 Si 原子,所以其外层的 4 个价电子形成共价键,多余的一个价电子受核的引力比共价键的束缚弱得多,所以较小的能量就使其挣脱磷原子的吸引成为自由电子(称为电离)。掺入一个磷原子,给出了一个自由电子,故磷为施主杂质(施主原子, N 型杂质)。自由电子带负电,英文为 Negative, 故称 N 型半导体。在 N 型半导体中,

$$\text{载流子} \left\{ \begin{array}{l} \text{自由电子数} = \left\{ \begin{array}{l} \text{掺杂原子数} \\ \text{激发产生的自由电子} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{多子} \\ \text{少子} \end{array} \\ \text{空穴数} \quad \text{由激发产生} \end{array} \right.$$

所以自由电子数远大于空穴数,自由电子称为多数载流子(多子),空穴称为少数载流子(少子)。

2. P 型半导体(空穴型半导体)

在半导体中掺入微量三价元素如 Al、Ga, 由于 Al 外层三个价电子与周围四个 Si 原子形成共价键时,缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位,当相邻共价键上的电子获得足够的能量时,有可能填补这个空位,原来硅原子的共价键则因为缺少一个电子形成了空穴(称为电离)。空穴带正电(Positive)。英文字头为 P, 故称为 P 型半导体。P 型半导体中,

$$\text{载流子} \left\{ \begin{array}{l} \text{空穴数} = \left\{ \begin{array}{l} \text{掺杂原子数} \\ \text{激发产生的空穴} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{多子} \\ \text{少子} \end{array} \\ \text{自由电子数} \quad \text{由激发产生} \end{array} \right.$$

空穴为多子,主要由掺杂形成;自由电子为少子,由热激发形成。空穴很容易俘获电子,使杂质原子成为负离子,三价杂质因而称为受主杂质。用 Al 掺杂时, Al 为受主杂质。

1.2 PN 结的形成及特性

本节学习四个问题：① PN 结的形成；② PN 结的单向导电性；③ PN 结的反向击穿；④ PN 结的电容效应。

1.2.1 PN 结的形成

1. PN 结的形成

N 型半导体中：

自由电子浓度 $\gg$ 空穴浓度
(多子) (少子)

P 型半导体中：

空穴浓度 $\gg$ 自由电子浓度
(多子) (少子)

但强调一点：无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，半导体中的正负电荷数是相等的。因此呈现电中性(激发和复合是一个动平衡)。

当 N 型半导体与 P 型半导体结合后，由于 N 型半导体电子浓度大，P 型半导体空穴浓度大，于是出现扩散(扩散是一种自然现象)，电子和空穴都要从浓度较高的地方向浓度较低的地方扩散，见图 1.4。P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。

当 N 区的电子越过界面，遇到的首先是界面附近的空穴，于是补充这个空穴即复合。

当电子与界面附近的空穴复合后，则界面附近的载流子用尽了，于是 P 型半导体和 N 型半导体的界面处形成了只有不能移动的正、负杂质离子(空间电荷)，这一区域称为空间电荷区。

因为在空间电荷区载流子被耗尽了，故称为耗尽层。又因耗尽层处于 P 型半导体和 N 型半导体的交界处(结合的位置)故称为 PN 结。

2. PN 结的作用

电子、空穴扩散，必经 PN 结，而 PN 结形成内电场(由于该电场是半导体内载流子的扩散运动形成的，故称为内电场)，内电场对多子的扩散起阻碍作用，见图 1.5。所以，PN 结又称阻挡层。

内电场促使 P 区的少子电子向 N 区运动，N 区的少子空穴向 P 区运动。这种运动称为漂移。

总之，PN 结的作用是阻碍多子的扩散，促进少子的漂移。

当 P 型半导体与 N 型半导体结合后，P 区空穴向 N 区扩散，同时 N 区电子向 P 区扩散，并伴随着复合。一段时间后，当扩散和漂移达到动平衡，就形成了 PN 结，其厚度一定，且杂质