

高等学校教材

计算机 电子线路与数字逻辑

主编 王魁臣 李新荃

NEUPRESS
社
东北大学出版

高等学校教材

计算机电子线路与数字逻辑

主 编 玉魁臣 李新荃

东北大学出版社
· 沈 阳 ·

(辽)新登字第8号

图书在版编目(CIP)数据

计算机电子线路与数字逻辑/王魁臣等主编。

—沈阳:

东北大学出版社·1994.8

ISBN 7-81006-874-1

I. 计...

II. 王...

III. 计算机-电子线路-数字逻辑

IV. TN710

内 容 提 要

本书包括“模拟电子技术基础”、“数字电子技术基础”、“数字逻辑”三部分內容,这三部分內容是互相联系,有机结合的。

编写的指导思想是:保证基础、突出重点、加强集成、着眼应用,不仅要为后续课打好基础,还要使学生掌握电子技术的基本理论、基本知识、基本技能,以及数字逻辑的分析和设计方法,培养学生分析问题解决问题的能力,并为以后从事硬件方面的工作打下基础。

本书是为计算机专业的学生编写的教材,还可做为有关专业本科生、自学考试、成人教育的教学用书。

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

北镇县印刷厂印刷

东北大学出版社发行

1994年8月 第1版

1994年12月 第2次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 22.375 字数: 558千字

印数: 4601~7600册

定价: 16.80元

责任编辑: 郝蕴卿

责任校对: 米 戎

封面设计: 唐敏智

责任出版: 高志武

前 言

本书是为计算机类专业的学生学习“模拟电子技术基础”、“数字电子技术基础”、“数字逻辑”三部分内容而编写的。但是,这三部分内容并不是独立的,而是有机的结合,故本书定名为《计算机电子线路及数字逻辑》。

本书内容是参照“电子技术基础”和“脉冲与数字电路”的基本要求,按120学时选取的。编写的主导思想是满足计算机类专业对电子线路与数字逻辑的要求,保证基础,突出重点,加强集成,着眼于应用,不仅为后续课打好基础,还要使学生获得电子技术的基本理论,基本知识,基本技能,数字逻辑的分析方法和设计方法,培养学生分析问题和解决问题的能力,并为以后从事“硬件”方面的工作打下基础。本书以“数字电子技术基础”和“数字逻辑”两部分为主,并使这两部分内容合到一起。在内容的编排上,讲完“管子”之后便讲数字部分,最后讲模拟部分和A/D及D/A转换。不仅把模型计算机作为典型数字系统,而且还把实现模型计算机作为本书的主线,这就加强了对计算机类专业的针对性。同时使数字逻辑内容的针对性和实用性得到了加强。对于模拟电路部分不再自成系统,而根据教学方便及外部设备和计算机电源的需要,选取内容编排顺序。

本书由王魁臣、李新荃主编。第一章由曲秀云编写,第二、三、四章由王魁臣编写,第五、六章由丛玉珍编写,第七、八、十二章由李新荃编写,第九、十、十一章由王永军编写。

本书是在总结多年的教学经验,在丛玉珍、王魁臣主编的《计算机电子线路》及田志芬、李新荃主编的《计算机电子线路与逻辑设计基础》两书的基础上编写的。由田志芬教授主审。在编写过程中得到了许多老师们的帮助,在此致以衷心的感谢。

本书可做为本科,自学考试,成人教育用书。讲授时应根据各自教学大纲安排教学内容。

由于我们的水平有限,时间紧促,书稿虽经多次修改,但一定仍存在不少缺点和错误,肯请批评指正。

编者

1994年4月

目 录

前言

| | |
|----|-----|
| 绪论 | (1) |
|----|-----|

| | |
|----------------|-----|
| 第一章 半导体二极管和三极管 | (4) |
|----------------|-----|

| | |
|-------------|-----|
| 1.1 半导体基础知识 | (4) |
|-------------|-----|

| | |
|-------------|-----|
| 1.1.1 本征半导体 | (4) |
|-------------|-----|

| | |
|-------------------|-----|
| 1.1.2 N型半导体和P型半导体 | (5) |
|-------------------|-----|

| | |
|-----------|-----|
| 1.1.3 PN结 | (6) |
|-----------|-----|

| | |
|------------|-----|
| 1.2 半导体二极管 | (8) |
|------------|-----|

| | |
|---------------------|-----|
| 1.2.1 二极管的伏安特性及主要参数 | (8) |
|---------------------|-----|

| | |
|----------------|------|
| 1.2.2 二极管的开关特性 | (11) |
|----------------|------|

| | |
|-------------|------|
| 1.2.3 特殊二极管 | (12) |
|-------------|------|

| | |
|------------|------|
| 1.3 半导体三极管 | (13) |
|------------|------|

| | |
|--------------|------|
| 1.3.1 双极型三极管 | (13) |
|--------------|------|

| | |
|-----------------------|------|
| 1.3.2 双极型三极管四种工作状态的判断 | (20) |
|-----------------------|------|

| | |
|-------------------|------|
| 1.3.3 双极型三极管的开关特性 | (21) |
|-------------------|------|

| | |
|---------------|------|
| 1.3.4 绝缘栅场效应管 | (22) |
|---------------|------|

| | |
|---------|------|
| 1.4 反相器 | (27) |
|---------|------|

| | |
|--------------|------|
| 1.4.1 三极管反相器 | (27) |
|--------------|------|

| | |
|--------------|------|
| 1.4.2 MOS反相器 | (28) |
|--------------|------|

| | |
|----|------|
| 习题 | (29) |
|----|------|

| | |
|------------|------|
| 第二章 数字逻辑基础 | (34) |
|------------|------|

| | |
|-----------|------|
| 2.1 数字和码制 | (34) |
|-----------|------|

| | |
|---------------|------|
| 2.1.1 常用的计数体制 | (34) |
|---------------|------|

| | |
|--------------|------|
| 2.1.2 数字间的转换 | (36) |
|--------------|------|

| | |
|-------------|------|
| 2.1.3 常用的编码 | (37) |
|-------------|------|

| | |
|---------------|------|
| 2.2 逻辑变量与逻辑函数 | (38) |
|---------------|------|

| | |
|-------------------|------|
| 2.3 高低电平和正、负逻辑的规定 | (39) |
|-------------------|------|

| | |
|------------------|------|
| 2.4 基本逻辑运算及基本逻辑门 | (39) |
|------------------|------|

| | |
|-------------------|------|
| 2.4.1 逻辑与(与运算)及与门 | (39) |
|-------------------|------|

| | |
|-------------------|------|
| 2.4.2 逻辑或(或运算)及或门 | (40) |
|-------------------|------|

| | |
|-------------------|------|
| 2.4.3 逻辑非(非运算)及非门 | (40) |
|-------------------|------|

| | |
|--------------|------|
| 2.5 复合逻辑及复合门 | (40) |
|--------------|------|

| | |
|-----------------------|------|
| 2.6 逻辑代数的基本公式,规则及常用公式 | (41) |
|-----------------------|------|

| | |
|------------|------|
| 2.6.1 基本公式 | (41) |
|------------|------|

| | | |
|------------|-------------------------|-------------|
| 2.6.2 | 三个规则 | (42) |
| 2.6.3 | 常用公式 | (42) |
| 2.7 | 逻辑函数的表示方法 | (43) |
| 2.7.1 | 真值表表示法 | (43) |
| 2.7.2 | 表达式表示法 | (43) |
| 2.7.3 | 逻辑图表示法 | (44) |
| 2.7.4 | 卡诺图表示法 | (44) |
| 2.8 | 逻辑函数的化简 | (49) |
| 2.8.1 | 逻辑函数表达式的类型 | (49) |
| 2.8.2 | 逻辑函数公式化简法 | (50) |
| 2.8.3 | 逻辑函数卡诺图化简法 | (51) |
| 2.9 | 具有无关项的逻辑函数化简 | (53) |
| 2.10 | 混合逻辑及等效替代法 | (54) |
| 2.10.1 | 负逻辑体制逻辑符号 | (54) |
| 2.10.2 | 等效逻辑符号替代法 | (55) |
| | 习题 | (56) |
| 第三章 | 集成逻辑门 | (58) |
| 3.1 | TTL 与非门 | (58) |
| 3.1.1 | TTL 与非门的工作原理 | (58) |
| 3.1.2 | TTL 与非门的电压传输特性及抗干扰能力 | (59) |
| 3.1.3 | TTL 与非门的输入特性,输出特性和带负载能力 | (60) |
| 3.1.4 | TTL 与非门的动态特性 | (63) |
| 3.1.5 | TTL 与非门的主要参数 | (64) |
| 3.2 | TTL 门电路的其它类型 | (65) |
| 3.2.1 | 集电极开路门(OC 门) | (65) |
| 3.2.2 | 三态输出门(TSL) | (68) |
| 3.3 | MOS 逻辑门 | (69) |
| 3.3.1 | NMOS 逻辑门 | (69) |
| 3.3.2 | CMOS 逻辑门 | (71) |
| 3.4 | TTL 电路与 MOS 电路之间的连接 | (74) |
| 3.4.1 | TTL 门驱动 CMOS 门 | (74) |
| 3.4.2 | CMOS 门驱动 TTL 门 | (74) |
| | 习题 | (74) |
| 第四章 | 组合逻辑电路 | (79) |
| 4.1 | 组合逻辑电路分析和设计 | (79) |
| 4.1.1 | 组合逻辑电路的分析 | (79) |
| 4.1.2 | 组合逻辑电路的设计 | (80) |

| | |
|------------------------------|--------------|
| 4.2 常用组合逻辑电路..... | (82) |
| 4.2.1 编码器..... | (82) |
| 4.2.2 译码器..... | (86) |
| 4.2.3 数据分配器..... | (91) |
| 4.2.4 数据选择器..... | (91) |
| 4.2.5 数码比较器..... | (92) |
| 4.2.6 算术运算电路..... | (95) |
| 4.2.7 奇偶校验电路 | (102) |
| 4.3 用中规模集成电路实现组合逻辑电路设计 | (105) |
| 4.3.1 用数据选择器实现组合逻辑函数 | (105) |
| 4.3.2 用译码器实现组合逻辑函数 | (106) |
| 4.3.3 用全加器实现组合逻辑函数 | (107) |
| 4.4 组合逻辑电路的竞争冒险 | (107) |
| 4.4.1 竞争与冒险 | (107) |
| 4.4.2 冒险现象判别 | (109) |
| 4.4.3 清除冒险现象的方法 | (110) |
| 习题..... | (112) |
| 第五章 触发器..... | (115) |
| 5.1 基本触发器 | (115) |
| 5.1.1 门锁电路及基本 RS 触发器 | (115) |
| 5.1.2 同步 RS 触发器 | (117) |
| 5.1.3 其他功能触发器 | (118) |
| 5.1.4 存在问题 | (121) |
| 5.2 TTL 集成触发器 | (122) |
| 5.2.1 集成 JK 触发器 | (122) |
| 5.2.2 集成 D 触发器 | (127) |
| 5.3 MOS 触发器..... | (128) |
| 5.3.1 三态 RS 锁存触发器 | (128) |
| 5.3.2 CMOS D 触发器 | (129) |
| 5.4 触发器逻辑功能的转换 | (131) |
| 5.5 集成触发器的主要参数 | (132) |
| 习题..... | (135) |
| 第六章 时序逻辑电路..... | (137) |
| 6.1 时序电路分析方法 | (138) |
| 6.1.1 同步时序电路分析举例 | (138) |
| 6.1.2 异步时序电路分析举例 | (141) |
| 6.2 寄存器 | (142) |

| | |
|---------------------------------|--------------|
| 6.2.1 数码寄存器 | (143) |
| 6.2.2 移位寄存器 | (145) |
| 6.3 计数器 | (147) |
| 6.3.1 计数器概述 | (147) |
| 6.3.2 二进制计数器 | (148) |
| 6.3.3 集成计数器 | (149) |
| 6.3.4 用集成计数器实现任意进制计数 | (153) |
| 6.3.5 计数器应用简介 | (154) |
| 6.4 时序逻辑电路设计 | (155) |
| 习题 | (161) |
| 第七章 脉冲电路 | (163) |
| 7.1 555 定时器 | (163) |
| 7.2 施密特触发器 | (165) |
| 7.2.1 施密特触发器特性 | (165) |
| 7.2.2 555 定时器构成的施密特触发器 | (165) |
| 7.2.3 集成施密特触发器 | (165) |
| 7.2.4 施密特触发器应用例 | (167) |
| 7.3 多谐振荡器 | (169) |
| 7.3.1 555 定时器构成的多谐振荡器 | (169) |
| 7.3.2 时钟电路 | (171) |
| 7.4 单稳态触发器 | (174) |
| 7.4.1 单稳态触发器特性 | (174) |
| 7.4.2 555 定时器构成的单稳态触发器 | (174) |
| 7.4.3 或非门构成的微分型单稳态触发器 | (176) |
| 7.4.4 单稳态触发器应用例 | (176) |
| 7.4.5 集成单稳态触发器 | (178) |
| 习题 | (179) |
| 第八章 半导体存储器与可编程逻辑器件 | (182) |
| 8.1 概述 | (182) |
| 8.2 顺序存取存储器(SAM) | (182) |
| 8.2.1 SAM 的结构及工作原理 | (183) |
| 8.2.2 SAM 中动态 CMOS 移位寄存单元 | (184) |
| 8.3 随机存取存储器(RAM) | (184) |
| 8.3.1 RAM 的存储单元 | (185) |
| 8.3.2 RAM 的结构 | (187) |
| 8.3.3 RAM 的扩展 | (188) |
| 8.4 固定只读存储器 ROM | (190) |

| | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------|
| 8.4.1 | 固定 ROM 的结构 | (190) |
| 8.4.2 | 用 ROM 实现逻辑函数 | (192) |
| 8.5 | 可编程逻辑器件(PLD) | (193) |
| 8.5.1 | PLD 逻辑电路表示法 | (193) |
| 8.5.2 | PROM 结构 | (194) |
| 8.5.3 | EPROM 结构 | (195) |
| 8.5.4 | 可编程逻辑阵列(PLA)结构 | (196) |
| 8.5.5 | 可编程阵列逻辑(PAL)结构 | (197) |
| 8.5.6 | 通用阵列逻辑(GAL) | (201) |
| | 习题 | (220) |
| 第九章 数字系统的分析与设计 | | (223) |
| 9.1 | 数字系统概述 | (223) |
| 9.2 | 简易数字计算机分析 | (224) |
| 9.2.1 | 简易计算机的组成 | (224) |
| 9.2.2 | 简易计算机的工作原理 | (235) |
| 9.3 | 寄存器传送语言 | (236) |
| 9.3.1 | 基本语句 | (237) |
| 9.3.2 | 设计举例 | (240) |
| | 习题 | (247) |
| 第十章 放大电路 | | (248) |
| 10.1 | 共发射极基本放大电路 | (248) |
| 10.1.1 | 电路组成及各元件作用 | (248) |
| 10.1.2 | 放大电路工作原理 | (249) |
| 10.1.3 | 放大电路的分析方法 | (250) |
| 10.1.4 | 静态工作点的稳定 | (259) |
| 10.1.5 | 共集电极放大电路 | (263) |
| 10.1.6 | 多级放大器 | (265) |
| 10.2 | 差动放大器 | (268) |
| 10.2.1 | 基本差动放大电路 | (268) |
| 10.2.2 | 射极带电阻的差动放大器 | (270) |
| 10.2.3 | 具有恒流源的差动放大器 | (272) |
| 10.2.4 | 差动放大器的四种连接方式 | (274) |
| 10.3 | 集成运算放大器 | (277) |
| 10.3.1 | 电路的结构及特点 | (277) |
| 10.3.2 | 集成运放的主要技术指标 | (279) |
| 10.4 | 负反馈放大器 | (280) |
| 10.4.1 | 反馈的基本概念 | (280) |

| | | |
|-------------|-----------------------|--------------|
| 10.4.2 | 负反馈对放大器性能的影响 | (284) |
| 10.4.3 | 深度负反馈放大器闭环电压放大倍数的近似计算 | (286) |
| 10.5 | 运算放大器的应用 | (288) |
| 10.5.1 | 理想运放及两个工作区 | (288) |
| 10.5.2 | 信号运算电路 | (289) |
| 10.5.3 | 电压比较器 | (293) |
| 10.5.4 | 波形发生器 | (295) |
| | 习题 | (298) |
| 第十一章 | 计算机电源 | (307) |
| 11.1 | 交流电源 | (307) |
| 11.1.1 | 交流稳压电源 | (307) |
| 11.1.2 | 不停电电源(UPS) | (308) |
| 11.2 | 直流稳压电源 | (310) |
| 11.2.1 | 串联线性调整式直流稳压电源 | (310) |
| 11.2.2 | 线性集成稳压器 | (315) |
| 11.3 | 无工频变压器开关稳压电源 | (317) |
| 11.4 | IBM-PC/XT 微机中的直流稳压电源 | (321) |
| | 习题 | (325) |
| 第十二章 | 数—模与模—数转换 | (327) |
| 12.1 | 数—模转换器(DAC) | (327) |
| 12.1.1 | 概述 | (327) |
| 12.1.2 | 二进制权电阻 DAC | (328) |
| 12.1.3 | R—2R 倒 T 型电阻网络 DAC | (329) |
| 12.1.4 | DAC 的主要技术指标 | (331) |
| 12.1.5 | 集成 DAC | (332) |
| 12.2 | 模—数转换器(ADC) | (336) |
| 12.2.1 | 概述 | (336) |
| 12.2.2 | 并行比较 ADC | (339) |
| 12.2.3 | 逐次逼近 ADC | (340) |
| 12.2.4 | 双积分 ADC | (342) |
| 12.2.5 | ADC 的主要技术指标 | (344) |
| 12.2.6 | 集成 ADC | (344) |
| 12.3 | 选择转换器常识简介 | (345) |
| | 习题 | (346) |
| | 参考文献 | (348) |

绪 论

自 1946 年第一台电子计算机问世以来,随着微电子学和计算机技术的发展,计算机获得了迅猛发展。这又使计算机技术取得了惊人的发展速度。今天,计算机和计算机技术已经成为一个国家科学技术发展水平的标志之一;已经成为高科技的一个方面;已经成为实现现代化的战略产业。

计算机有两个发展方向。一是朝着大型和快速的方向发展,二是朝着微型方向发展,前者在国防尖端和科学研究中起到了巨大作用。后者由于它的成本低、体积小,使得计算机占领了各个技术领域。

随着计算机技术的发展,逻辑设计明显地出现了两个分支,即硬件逻辑设计和软件逻辑设计。软件逻辑是由硬件支持下的程序设计实现的。软件逻辑是逻辑设计的主要手段。但是,硬件逻辑设计是不可缺少的。这是因为,一,没有硬件支持,软件是无法发挥逻辑设计作用的,二,硬件逻辑的操作速度快,灵活性大。

本书包含有模拟、数字、数字逻辑三部分内容。将系统地介绍构成计算机的基础电路、单元电路,逻辑部件,硬件逻辑设计的基础理论和设计方法。

1. 电子电路

电子电路是指包含有电子器件的电路。常用的电子器件有半导体二极管和三极管、场效应管、电子管等。

由单个电子器件、电阻、电容、电感、变压器等导线连接起来的电路称作分立电路。将电子器件和电阻、电容等元、器件制做在一块硅片上的电路称为集成电路。

集成电路分成线性集成电路和数字集成电路两大类。对于数字集成电路,按集成电路芯片中元、器件数,即按集成度又分成小规模集成电路(SSI),中规模集成电路(MSI),大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)。

2. 模拟电路和数字电路

电子电路分为模拟信号和数字信号两大类。工作信号为模拟信号和数字信号。工作信号为模拟信号和数字信号。工作信号为模拟信号和数字信号。工作信号为模拟信号和数字信号。

模拟信号是指在时间和幅度上均连续变化的信号。例如,正弦波信号,心电信号等。

数字信号是指在时间和幅度上均不连续,且幅度只有两个离散值 0 和 1 的信号。例如,汽车生产线上,开出一台汽车时给出的信号是 1,而没有汽车开出时则给出的信号是 0。

3. 数字逻辑

使用二值(0 和 1)代码来传递和加工处理信息的实际工程系统称为数字系统,也称作数字逻辑系统。数字计算机本身就是一个数字系统。

“逻辑”一词始于逻辑学。数字电路研究的对象是数字电路的输出与输入之间因果关系。也就是说研究电路的逻辑关系。

数字电路也称作数字逻辑电路。数字电路分成组合逻辑电路和时序逻辑电路两类。数字电路中有逻辑运算和数字运算两种运算。逻辑运算反映逻辑关系。数字运算反映数量关系。

4. 计算机基本结构

电子数字计算机开始是作为计算工具出现的。计算机怎么能够自动地完成计算，它由那几部分组成呢？下面通过算盘和计算机计算下式进行说明。

$$163 \times 156 + 166 \div 34 - 120 \times 36 = ?$$

用算盘计算上式，首先得有一个算盘作为运算工具，其次还要有纸和笔用来记录数据。包括原始数据、中间结果以及最后运算结果。用算盘计算的过程是在人控制下进行的。第一步计算 163×156 ，并把计算结果记在纸上。第二步计算 $166 \div 34$ 。第三步把第二步计算结果和第一步计算结果相加，并将其结果记在纸上。第四步计算 120×36 。第五步把第四步的计算结果从第三步的结果中减去，就得到了最后结果。

用计算机完成上述计算过程，显然得有一个代替算盘进行运算的部件，它就是运算器。代替纸和笔作用的部件为存储器。存储器能记忆原始题目，原始数据，中间结果以及为了使计算机自动进行运算而编制的命令。代替人的控制作用的部件为控制器。控制器能根据事先编好的命令发出各种控制信号，使整个计算一步一步地进行。除上述三部分之外，还要有输入原始数据和命令的输入设备及输出计算结果的输出设备。有了上述五部分，就构成一个基本计算机系统。其框图如图 1 所示。

图 2 示出了模型计算机框图(输入、输出设备除外)。该模型计算机由十个逻辑部件组成。它们分别是：

- (1) 存储器(EPROM)
- (2) 时钟信号源
- (3) 节拍发生器
- (4) 控制电路(CON)
- (5) 指令寄存器和译码器(IR)
- (6) 算术逻辑单元(ALU)
- (7) 累加器(A)
- (8) 程序计数器(PC)
- (9) 存储器地址寄存器(MAR)
- (10) 数据寄存器(DR)

上述十个逻辑部件都是本课程所要介绍的内容。它们都是由基本电路——逻辑门和触发器等构成。而逻辑门和触发器又由半导体二极管、三极管、场效应管、电阻、电容等组成。这说明半导体二极管、三极管、场效应管是放大器、逻辑门、触发器的基础；放大器、逻辑门、触发器是逻辑部件的基础；逻辑部件又是数字系统的基础。

5. 如何学好本门课程

本门课程是一门入门性质的技术基础课。它不仅为计算机组成原理、微型计算机等后续课打好基础，本身就是一门硬件方面的重要基础课。

本门课程的任务是使学生获得电子技术的基本理论，基本知识，基本技能，掌握数字逻辑的基本分析方法和设计方法，培养学生分析问题、解决问题能力以及工程实验能力。学习本门课程应注意以下几点：

(1) 注意工程观点。例如，采用近似估算方法，可以使复杂电路的计算得以简化。但是，做近似计算时，必须注意近似计算是否合理。就是要看产生的误差是否在容许范围内。

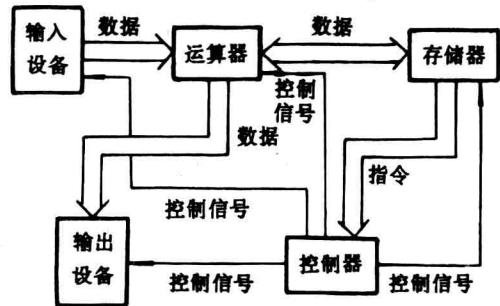


图 1 计算机的结构图

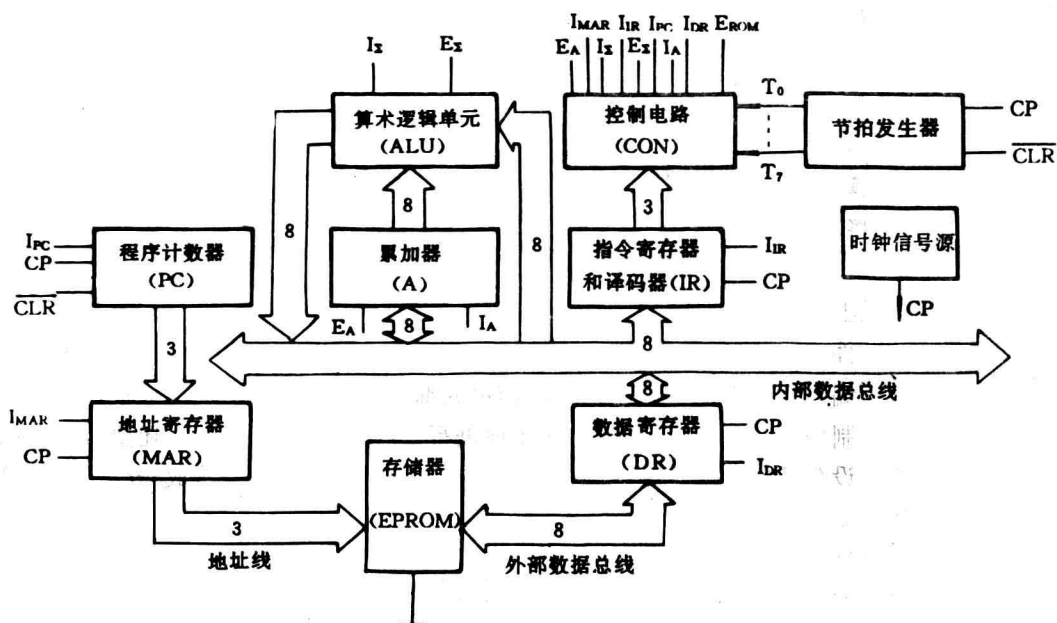


图2 模型机框图

(2)重视实验技术。本门课程是一门实践性很强的课程。通过实验可以达到熟悉常用电子仪器；掌握基本的电子电路的测量和调试技术；做到理论和实践相结合，从中培养分析问题、解决问题及工程实践能力，养成严谨认真的工作作风，实事求是的科学态度；提高书写报告的能力。

(3)应着重抓好“三基”的学习。“三基”是指基本理论，基本知识，基本方法。

(4)熟记基本电路的逻辑功能，并了解其性能。

(5)能熟练运用微变等效电路、逻辑函数表示等分析、设计电路的“工具”。

(6)能熟练运用数字电路的分析方法和设计方法。

(7)由于本门课程涉及面宽，内容多，而且各章之间既有联系又相对独立。这就要求读者必须及时复习。

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是组成半导体电路的核心部件,电路的性能与其所用器件的特性有密切的关系。因此,学习半导体电路,必须首先了解半导体器件的工作原理,掌握它的工作特性和参数。本章主要介绍半导体二极管,双极型三极管和场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。并简要介绍了半导体三极管组成的反相器。

1.1 半导体基础知识

物质按其导电性能分为导体、绝缘体和半导体。对于导体和绝缘体,我们都已了解,这里,我们只讨论半导体。半导体,顾名思义,其导电性能是介于导体和绝缘体之间。但是,半导体有一很重要的性质,即:它的导电能力受温度、光照和掺入杂质的影响很大。正是由于这个特点,使得半导体获得广泛应用,制造成各种各样的半导体器件。半导体分本征半导体和杂质半导体。

1.1.1 本征半导体

自然界中,半导体材料很多。目前,用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si),其次是锗(Ge)等。那么它们的原子结构存在什么特点呢?从图 1-1a)、b)硅和锗外层电子结构图可见,它们的一个共同特点是最外层电子数都是 4 个,即硅和锗都是四价元素。最外层电子受原子核的束缚力最小,这层电子称为价电子。物质的化学性质和导电性质都与原子最外层的价电子有关。因此,价电子是我们重点研究的对象。一般画图时,硅和锗原子用图 1-1c)的简单模型表示。图中圈内的+4 表示除最外层四个价电子外,原子核与内层电子合在一起共带四个正电荷(称为惯性核)。这样,整个原子是电中性的。

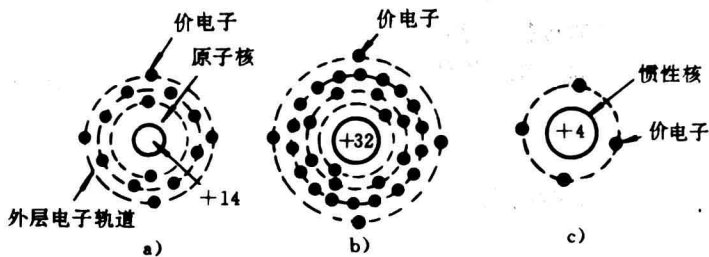


图 1-1 硅和锗的原子结构

a) 硅(Si)原子结构 b) 锗(Ge)原子结构 c) 硅和锗原子结构简化模型

硅和锗半导体材料都是单晶体结构。在晶体中,原子的排列非常整齐,原子是按四角系统组成晶体点阵的。原子之间的距离靠得很近,电子不仅受到自身原子的作用,还要受到相邻原子的作用,产生了轨道的交叠。由原子理论还知道,当原子的外层有八个电子时,才处于稳定状

态。锗和硅只有四个价电子，它们在组成单晶时，每个原子都从四周相邻原子取得四个价电子构成了稳定状态。这样，每相邻两个原子都共用一对价电子，形成了共价电子对。这种结构称为共价键结构。图 1-2 为晶体的共价键结构平面示意图。

纯净的单晶半导体称为本征半导体。在绝对零度(即 $T = 0\text{K}$)和无外界激发时，硅和锗晶体中没有自由电子存在，呈现绝缘体的特性。但在常温下，或者受到光照时，共价键中的价电子获得能量，当一部分价电子得到的能量足够大时，便脱离共价键的束缚成为自由电子。所以，在常温下，本征半导体具有一定的导电能力。值得注意的是：半导体中除了自由电子作为运载电荷的载流子之外，还存在另外一种载流子——空穴载流子，这是半导体的重要特点。

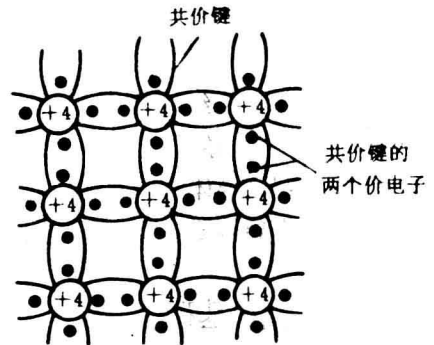


图 1-2 晶体的共价键结构

共价键上的电子挣脱束缚成为自由电子后，在它原来的位置上留下了一个空位，叫空穴。带有空穴的原子因为少了一个电子而带正电，我们将其看成是空穴所带的正电荷。空穴也能够运动，不过它的运动方式和自由电子的运动方式完全不同，空穴的运动实质上是价电子填补共价键上空位的运动结果。例如，在图 1-3 中，共价键 A 处有空穴，附近共价键上的价电子有可能过来填补这个空位，比如 B 处的价电子去填补 A 处的空穴，于是 A 处空穴消失，B 处出现空穴。同理在 B 处附近的价电子又可能去填补这个空穴，这样，就好象空穴移动一样。由于空穴带正电，空穴移动必然伴随有正电荷的移动，所以空穴也是载流子。

可见半导体中将同时激发出两种载流子——自由电子(带负电荷)和空穴(带正电荷)。自由电子和空穴总是成对出现的，通常称之为电子空穴对。如图 1-3 所示。

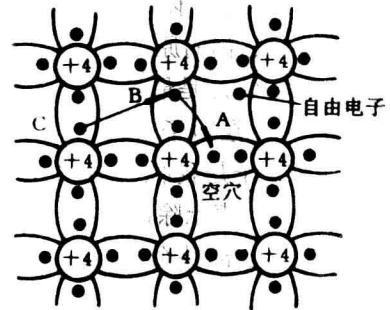


图 1-3 本征激发产生电子空穴对

1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

本征半导体的导电率很低，如果人为地在本征半导体中掺入某些微量的元素称为杂质，则其导电能力将发生显著的变化。人们可以通过掺入杂质元素的种类和数量来改变和控制半导体性能，制成各种各样的半导体器件。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素，可使半导体中的自由电子的浓度大大增加，形成 N 型半导体。如图 1-4 所示。

在硅本征半导体中掺入五价杂质元素后，则晶体点阵中某些位置被杂质原子占有。杂质中的四个价电子与周围四个硅原子组成共价键后，还多出一个价电子，这个多余的价电子虽然不受共价键的束缚，但仍受到这个杂质原子的吸引而在其周围运动。由于不受共价键的束缚，因此只需较小的能量就能挣脱原子核的束缚，变成自由电子，并参与导电。实际上，只要在常温下，这些多余的电子就具有足够的能量挣脱原子核的束缚，全部变成自由电子，杂质原子因失去一个电子而成为正离子，正离子不参与导电，不是载流子。五价杂质原子能施放出一个电子，

故叫施主原子。其他硅原子由于本征激发仍产生电子空穴对。

这种杂质半导体虽然掺入杂质很少,但一个杂质原子提供一个自由电子,它在数目上远远超过本征激发下出现的电子空穴对数目,所以,在这种半导体中,以电子导电为主,称为N型半导体,电子称为多数载流子,空穴称为少数载流子。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素,可使半导体中空穴的浓度大大增加,形成P型半导体,如图1-5所示。

在硅本征半导体中掺入三价杂质元素,则晶体点阵中某些位置被杂质原子占有。由于杂质原子是三价的,和周围的四个硅原子组成共价键时缺少一个电子,出现一个空位。而这个空位很容易被周围的价电子填充,于是在该价电子原来的位置上产生一个空穴。杂质原子因接受一个价电子而成为不能移动的负离子。这里三价杂质原子接受电子,故称为受主原子。其他硅原子由于本征激发仍产生电子空穴对。

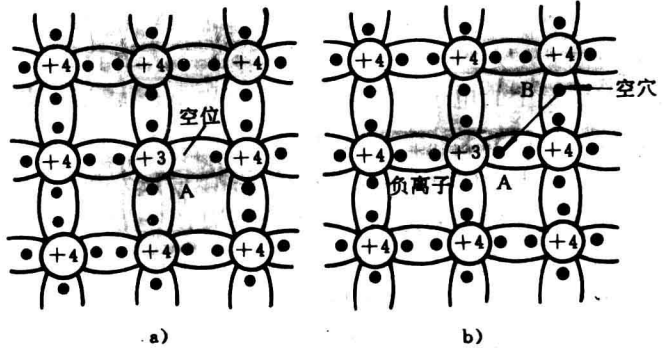


图1-5 P型半导体晶体结构示意图
a) 空位 b) 空穴和负离子

实际上,常温下,价电子就具有足够的能量,能够将所有杂质原子上的空位填满,产生与杂质原子数目相等的空穴,使得这种半导体的空穴载流子浓度增加,于是多数载流子是空穴,少数载流子为电子,称为P型半导体。

从上面可知,多子的浓度与掺入杂质的浓度有关,掺入杂质越多,多子的浓度越大。而少子浓度与温度有关。

1.1.3 PN结

前面提到在本征半导体中掺入杂质元素形成的杂质半导体,其导电能力提高,然而我们关心的是两种不同杂质半导体连接在一起时,在交界面所形成的PN结。PN结具有特殊的特性,它是组成各种半导体器件的基础。下面介绍PN结的形成以及它的特性。

1. PN结形成

当P型和N型半导体通过一定的工艺结合在一起时,在其交界面处附近形成一个很薄的空间电荷层,这就是PN结。

PN结的形成可以这样解释,当N型和P型半导体结合在一起时,由于在交界面处存在着电子和空穴的浓度差,P型区中空穴浓度高于N区,N型区中电子浓度高于P区,因此,N区的多子电子便向P区扩散,而P区的多子空穴向N区扩散,结果,在交界面处附近的P区一侧

因失去空穴而留下不能移动的负离子；同样在 N 区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子。扩散到对方的载流子成为对方的少数，且与该区多子产生复合，使电子空穴对消失。这样在交界面附近便出现了正负离子数相等的很薄的空间电荷区，即 PN 结。由于正负离子的相互作用，建立起一个电场，称为内电场，其方向是由 N 区指向 P 区，如图 1-6 所示。显然内电场的作用是阻止扩散继续进行的，另一方面，少子却在内电场的作用下漂移到对方。所谓漂移，就是载流子在电场作用下作定向运动。那么何时达到扩散与漂移运动平衡呢？

刚开始，内电场较弱以扩散运动为主，随着扩散运动的进行，内电场逐渐增强，多子的扩散运动减弱。而少子的漂移运动加强。扩散所形成的电流为扩散电流，少子漂移形成的电流为漂移电流。当扩散电流等于漂移电流时，PN 结达到平衡状态，空间电荷区稳定。PN 结又叫“势垒区”，“阻挡层”，或“耗尽层”。

2. PN 结的单向导电特性

上面讨论了 PN 结无外加电压时的情况，现在讨论它的外部特性。

(1) 外加正向电压(正向偏置)

PN 结加正向电压，即 P 区接电源正极，N 区接电源负极，如图 1-7 所示，外加电压形成的电场与 PN 结内电场方向相反，削弱内电场，打破了 PN 结的平衡状态，此时，P 区的多子空穴和 N 区的多子电子向 PN 结移动，并进入到空间电荷区与正负离子中和使空间电荷区变窄，内电场削弱，有利于多子的扩散运动，使得扩散电流增加。形成了较大的正向电流。正向电压越大，空间电荷区越窄，正向电流 I 越大。而少子的漂移运动则随着内电场的削弱其值趋于零。

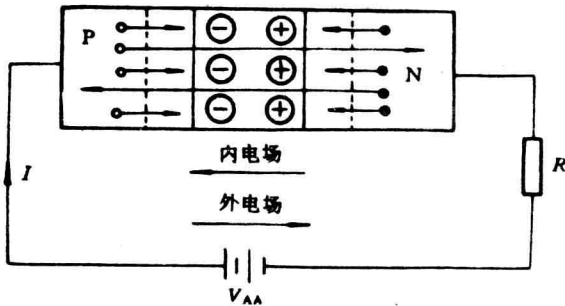


图 1-7 PN 结加正向电压

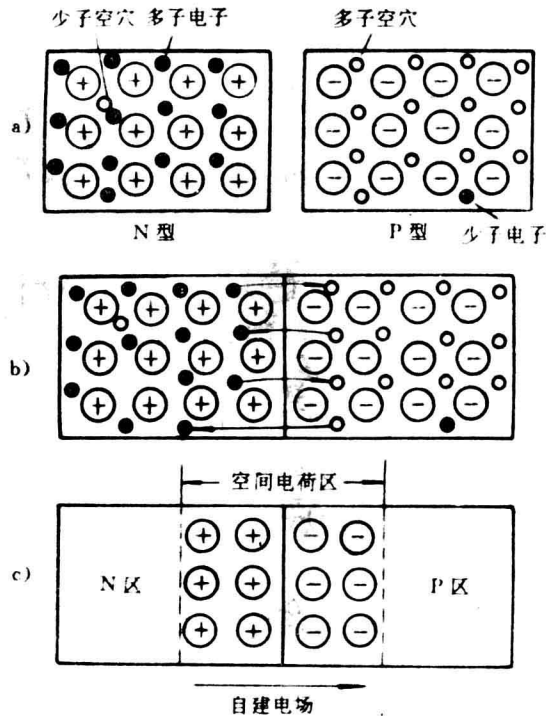


图 1-6 PN 结的形成

a) P 型和 N 型半导体 b) 多数载流子扩散 c) 空间电荷区

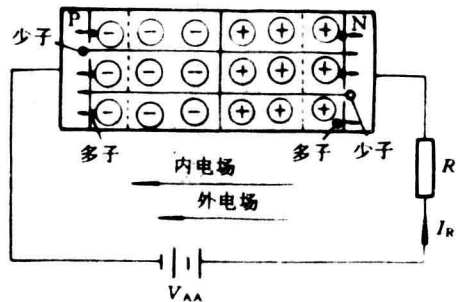


图 1-8 PN 结加反向电压