

模拟

ANALOG
ELECTRONIC
CIRCUITS

电子电路

■ 王丽 主编
张玉红 副主编



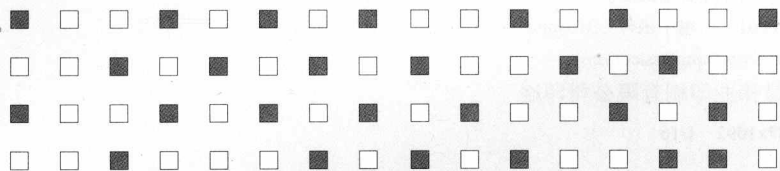
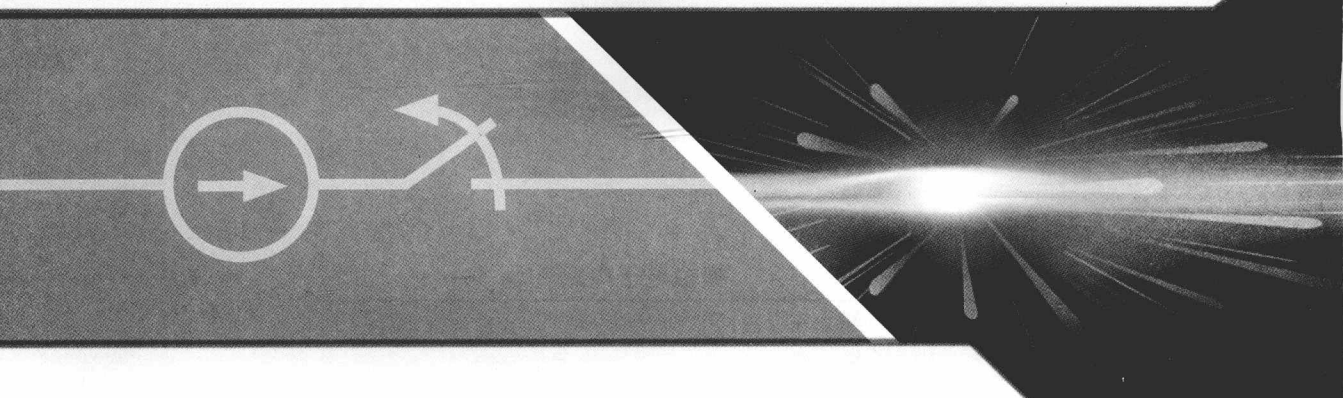
 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

模拟

ANALOG
ELECTRONIC
CIRCUITS

电子电路

■ 王丽 主编
张玉红 副主编



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

模拟电子电路 / 王丽主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-115-23686-9

I. ①模… II. ①王… III. ①模拟电路 IV.
①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第152317号

内 容 提 要

本书结合具体实例系统地介绍了模拟电路的基本概念、结构及特点, 以及各种电子电路分析方法。全书共分为 11 章, 内容包括半导体材料、器件(二极管、三极管、场效应管)及其基本电路、功率放大器、集成运算放大器及其应用电路、负反馈放大器、直流稳压电源和电子电路的计算机辅助分析与设计。

针对当前院校模拟电子电路学科学时少的特点, 在本书编写时对内容进行了认真的精选, 非常适合作为各院校电子信息、通信、计算机等专业的专业基础课——“模拟电路”课程的教材和参考书。

模拟电子电路

◆ 主 编 王 丽
副 主 编 张玉红
责任编辑 王建军
执行编辑 李 静

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14
字数: 346 千字
印数: 1-3000 册

2010 年 10 月第 1 版
2010 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-23686-9

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

“模拟电子电路”是高等院校电类专业的一门技术基础课，是“电路分析基础”的后续课程。

本书系统地介绍了模拟电路的基本概念、结构及特点，以及各种电子电路分析方法。内容包括半导体材料、器件（二极管、三极管、场效应管）及其基本电路、功率放大器、集成运算放大器及其应用电路、负反馈放大器、直流稳压电源和电子电路的计算机辅助分析与设计。

本书以放大器分析为主线，在编写过程中体现如下特点：

- (1) 本书内容经过认真精选，适用于当前学时少的情况；
- (2) 加强基础知识，即基本概念、基本原理及基本分析方法；
- (3) 为了帮助学生克服入门的困难，本书对基础知识的讲解极注重启发性，以便激励学生边读边思考，以及方便学生自学；
- (4) 突出“模拟电子电路”课程的工程性，强调工程近似分析方法；
- (5) 加强各课程间交叉渗透的内容，注重与“电路分析基础”等先修课程的衔接，适当运用一些其他学科的原理、方法解决本课程的问题，以便调动学生思维的主观能动性；
- (6) 习题形式多样化，全方位培养学生独立思考和创新的能力。

全书分为 11 章，大体可以分为两大部分。前 5 章为第 1 部分，主要介绍基本器件和基本电路。半导体器件包括二极管、双极型三极管和场效应管等，它们是构成各种功能电路的核心元件。一般情况下，初学者对这一部分内容可能会感觉比较枯燥和比较不容易理解。因此，在学习半导体器件时，可以和简单电路穿插学习，以便消除厌烦情绪。基本放大电路是构成各种功能电路和集成电路的基础，需要重点掌握和多做练习。后 6 章为第 2 部分，主要介绍放大器深层次的内容，包括放大器增益与频率的关系即频率响应，放大器的输出级即功率放大器，改善电路性能的负反馈放大器，集成运算放大器及其应用电路，此外还介绍了各种电子设备都要使用的直流稳压电源。

本书由王丽、张玉红担任主编和副主编。在编写和出版的过程中，我们得到了吉林大学通信工程学院领导的大力支持和电工电子教学中心全体同事的帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中可能存在缺点、疏漏和错误，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4.1 整流电路	22
1.1 电子技术的发展与应用概况	1	2.4.2 钳位电路	23
1.2 电信号	2	2.4.3 限幅电路	23
1.2.1 什么是电信号	2	2.5 其他二极管	24
1.2.2 模拟信号	2	2.5.1 稳压二极管	24
1.3 电子信息系统	3	2.5.2 变容二极管	25
1.4 线性放大电路	3	2.5.3 发光二极管	25
1.4.1 放大电路的方框图	3	2.5.4 光敏二极管	26
1.4.2 放大电路的性能指标	4	2.5.5 光电耦合器	26
1.5 小结	5	习题	26
习题	5	第 3 章 双极型晶体管	29
第 2 章 半导体材料、二极管及二 极管电路	6	3.1 双极型晶体管基础	29
2.1 半导体基础知识	6	3.1.1 双极型晶体管的结构	29
2.1.1 本征半导体	6	3.1.2 双极型晶体管在线性 状态下的运用	29
2.1.2 杂质半导体	8	3.1.3 晶体三极管的电流—电压 特性	32
2.1.3 两种导电机理——漂移和 扩散	10	3.2 双极型晶体管的直流分析	35
2.1.4 小结	11	3.2.1 双极型晶体管的一般模型	35
2.2 PN 结	12	3.2.2 直流负载线法	39
2.2.1 PN 结形成的物理过程	12	3.3 晶体三极管偏置电路	41
2.2.2 PN 结的伏安特性	12	3.3.1 固定偏置电路	41
2.2.3 PN 结的击穿特性	14	3.3.2 分压式偏置电路	42
2.2.4 PN 结的电容特性	15	3.4 小结	43
2.2.5 小结	17	习题	44
2.3 晶体二极管及电路分析方法	17	第 4 章 晶体三极管放大器的基 础知识	46
2.3.1 晶体二极管的几种 常见结构	17	4.1 放大器的工作原理	46
2.3.2 伏安特性	18	4.1.1 放大器的组成原则	46
2.3.3 晶体二极管等效模型	18	4.1.2 图解法分析放大电路的 动态特性	47
2.3.4 晶体二极管电路分析方法	20	4.2 小信号模型法分析	48
2.4 晶体二极管的应用	22		

8.3.2 F007 集成运放内部 电路分析	142	10.2.1 比例运算电路	172
8.4 小结	143	10.2.2 加减运算电路	173
习题	143	10.2.3 积分运算电路和微分 运算电路	175
第 9 章 反馈放大器	148	10.2.4 对数运算电路和指数 运算电路	176
9.1 反馈放大器的基本概念	148	10.2.5 乘法运算电路和除法 运算电路	177
9.1.1 反馈概述	148	10.3 电压比较器	178
9.1.2 反馈放大器的分类	150	10.3.1 电压比较器的传输特性 ..	178
9.1.3 反馈类型的判别	152	10.3.2 单限电压比较器	179
9.2 负反馈对放大器性能的改善 ..	155	10.3.3 迟滞比较器	181
9.2.1 提高放大倍数的稳定性 ..	155	10.3.4 窗口比较器	183
9.2.2 调节输入电阻和输出 电阻	157	10.4 小结	183
9.2.3 扩展频带	158	习题	184
9.2.4 减小非线性失真	160	第 11 章 直流稳压电源	188
9.3 深度负反馈条件下的 近似计算	161	11.1 整流电路	188
9.3.1 深度负反馈条件和近似 计算方法	161	11.1.1 半波整流电路	188
9.3.2 近似计算举例	161	11.1.2 全波整流电路	189
9.3.3 “虚短”和“虚断”的 概念	164	11.1.3 桥式整流电路	190
9.4 小结	165	11.2 滤波电路	191
习题	165	11.2.1 电容滤波器	191
第 10 章 集成运算放大器的应用	170	11.2.2 其他形式的滤波电路 ..	194
10.1 集成运算放大器的基本 应用	170	11.3 倍压整流电路	194
10.1.1 集成运算放大器的 理想化条件	170	11.3.1 三倍压整流电路	195
10.1.2 集成运算放大器的 工作区	170	11.3.2 多倍压整流电路	195
10.2 集成运算放大器的基本 运算电路	172	11.4 稳压电路	196
		11.4.1 硅稳压管稳压电路	196
		11.4.2 串联型稳压电路	198
		11.5 小结	199
		习题	200
		附录 SPICE 与 PSpice 简介	203
		参考文献	215

第 1 章 绪 论

1.1 电子技术的发展与应用概况

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。电子技术最早应用于通信领域和军事领域。随着电子科学技术不断发展,尤其是近 10 余年来,以信息科学技术为中心的包括计算机技术、生物基因工程、光电子技术、军事电子技术、生物电子学、新型材料、新型能源、海洋开发工程技术等高新技术群的兴起,引起人类社会从生产到生活各个方面巨大变革。电子技术是其他高新技术发展的基础和龙头,它的发展带动了其他高新技术的发展。因此,当今世界没有一个国家不把发展电子信息技术摆在优先地位。

各种电子设备都是由电子电路构成的。电子电路是由电子器件(又称有源器件,如电子管、晶体二极管、晶体管、集成电路等)和电子元件(又称无源器件,如电阻器、电容器、电感器、变压器等)组成的具有一定功能的电路。电子器件是电子电路的核心。电子器件的发展促进了电子技术的发展;同时,生产力和科技进步对电子技术的新要求,又将促进电子器件的改进和新型器件的发明。

1904 年,电子管的发明使电子技术进入了第一个时代——电子管时代。从此,无线电通信、电视、广播、雷达、导航电子设备和计算机等开始问世,并得到迅速发展。

1948 年贝尔(Bell)实验室发明晶体管后,使电子技术进入晶体管时代,拉开了人类社会步入信息时代的序幕。晶体管广泛应用,开创了电子设备朝小型化、微型化发展的新局面。

1958 年,德克萨斯仪器公司发明了集成电路,使电子技术进入集成电路时代。它的出现打破了由电子管、晶体管等独立电子器件和元件构成的分立元件电路(Discrete Component Circuit)的传统观念,使电子技术的发展与应用有了新的突破。集成电路芯片是通过一系列特定的加工工艺,将晶体管、二极管等有源元件和电阻、电容等无源元件,按照一定的电路互连,“集成”在一块晶体单晶片上,实现特定的电路或系统功能。它具有外接元件少、可靠性高、便于安装与调试等优点。集成电路的集成度以年增长率 46% 的速率持续发展,而产品价格则直线下降,因而应用范围迅速扩大。集成电路已从 20 世纪 60~70 年代的小、中规模进入 80~90 年代的大规模和超大规模集成电路。当前已进入系统集成芯片(System on Chip, SOC)的时代,可将整个系统或子系统集成在一个硅芯片上。进一步发展,可与特种物理的、化学的和生物的敏感器(完成信息获取功能)和执行器与信息处理系统集成在一起,从而完成信息获取、处理、存储、传输到执行的系统功能,这是一个更广义上的系统集成芯片。可以认为这是电子技术又一次革命性变革,它已如同细胞组成人体一样,成为现代工农业、第三产业、国防装备和家庭耐用消费品的细胞。

2000 年以集成电路为基础的电子信息产业已成为世界第一大产业。电子信息产业的发展

在国民经济发展中具有十分重要的战略意义。现代经济发展的数据表明，GDP 每增长 100 元，需要 10 元左右的电子工业产值和 1~3 元集成电路产值的支持。几乎所有的传统产业只要与电子技术结合，用集成电路进行智能改造，就会使传统产业重新焕发青春。例如汽车的电子化导致汽车工业的革命，目前先进的现代化的汽车，电子装备已占其总成本的 70%。进入信息化社会，集成电路成为武器的一个组成单元，于是电子战、智能武器应运而生。雷达的精确定位和导航，战略导弹的减重增程，战术导弹的精确制导，巡航导弹的图形识别与匹配，以及各类卫星的有效载荷和寿命的提高等，其核心技术都是微电子技术。

不久前美国工程技术界评选出 20 世纪世界最伟大的工程技术成就，在对第 5 项电子技术成就评论时指出，“从真空管到晶体、集成电路已成为各行各业智能工作的基石。”由于集成电路的原料是硅，它改变着社会的生产方式和人们的生活方式，不仅成为现代产业和科学技术的基础，而且正在创造着、代表着信息时代硅文化（Silicon Culture），因此有科学家认为人类继石器、青铜器、铁器时代之后进入硅石时代。

1.2 电信号

1.2.1 什么是电信号

信号是反映消息的物理量，例如工业控制中的温度、压力、流量，自然界的声信号等，因而信号是消息的表现形式。人们所说的信息，是指存在于消息之中的新内容，例如人们从各种媒体上获得原来未知的消息，就是获得了信息。可见，信息需要借助于某些物理量（如声、光、电）的变化来表示和传递，广播和电视利用电磁波来传送声音和图像就是最好的例证。

由于非电的物理量很容易转换成电信号，例如通过热电偶或温度传感器可将温度信号转换为电信号，可用话筒将声音信号转换为电信号等；而且电信号又容易传送和控制，因而电信号成为应用最为广泛的信号，信号通过电信号进行传送、交换、存储、提取等。电信号是指随时间而变化的电压 v 或电流 i ，电子电路中的信号均为电信号，以下简称为信号。

1.2.2 模拟信号

信号的形式是多种多样的，可以从不同角度进行分类。例如，根据信号是否具有随机性分为确定信号和随机信号；根据信号是否具有周期性分为周期信号和非周期信号；根据信号对时间的取值分为连续时间信号和离散时间信号。而在电子电路中则将信号分为模拟信号和数字信号。

模拟信号在时间和数值上均具有连续性，即对应于任意时间值 t 均有确定的函数值 v 或 i ，并且 v 或 i 的幅值是连续取值的。例如，正弦波信号就是典型的模拟信号。

与模拟信号不同，数字信号在时间和数值上均具有离散性， v 或 i 的变化在时间上不连续，总是发生在离散的瞬间，且它们的数值是一个最小量值的整倍数，并以此倍数作为数字信号的数值。

应当指出，大多数物理量所转换成的信号均为模拟信号。在信号处理时，模拟信号和数字信号可以相互转换。例如，用计算机处理信号时，由于计算机只能识别数字信号，故需将模拟信号转换成数字信号，称为模数转换；由于负载常需模拟信号驱动，故需将计算机输出

的数字信号转换为模拟信号，称为数模转换。本书所涉及的信号均为模拟信号。

1.3 电子信息系统

电子信息系统可以简称为电子系统。图 1-1 所示为模拟电子系统的示意图。系统首先采集信号，即进行信号的提取。通常，这些信号来源于测试各种物理量的传感器、接收器，或者来源于测试信号的发生器。对于实际系统，传感器或接收器所提供的信号的幅值往往很小，噪声很大，且易受干扰，有时甚至分不清什么是有用信号，什么是干扰或噪声，因此在加工信号之前需将其进行预处理。进行预处理时，要根据实际情况利用隔离、滤波、阻抗变换等各种手段将信号分离出来并进行放大。当信号足够大时，再进行信号的运算、转换、比较、采样保持等不同的加工。最后，一般还要经过功率放大驱动执行机构（负载），或者经过模拟信号到数字信号的转换变为计算机可以接收的信号。

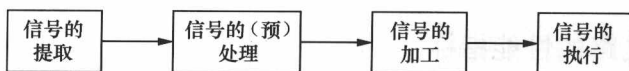


图 1-1 电子信息系统的示意图

对模拟信号处理的电路称为模拟电路，对模拟信号最基本的处理是放大。放大电路是构成各种功能模拟电路的基本电路。

1.4 线性放大电路

在电子信息系统中，放大电路是模拟电子电路的基础。图 1-2 所示为扩音机示意图，直流电源是电路的供电电源。声音通过话筒（传感器）转换为电信号，经扩音机（放大电路）放大到足够大，再驱动执行机构（扬声器），扬声器所发出的声音较之人所发出的声音信号要大得多。任何放大电路都需要直流电源供电，在扩音机中，放大电路控制直流电源将声音转换成按输入端从话筒（传感器）送来的 20Hz~20kHz（音频）电信号放大一定倍数后作用于扬声器，或者说直流电源通过放大电路将直流能量转换为交流能量输出到扬声器。

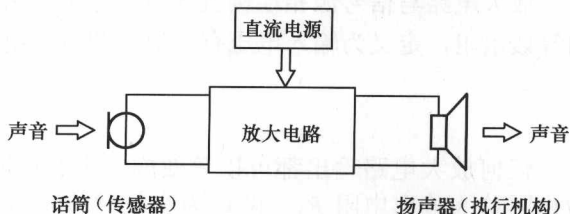


图 1-2 扩音机示意图

由此可见，电子电路中放大的本质是能量的控制和转换，信号源提供的能量小，而负载获得的能量大，因而电子电路放大的基本特征是功率放大。能够控制能量的元件称为有源元件，如晶体三极管、场效应管，它们是放大电路中的核心元件。放大电路中放大的对象为变化量，对放大电路最基本的要求是不失真。

放大电路的作用是将输入信号进行不失真的放大，使输出信号强度大于输入信号强度，且不失真地重现输入信号波形。

1.4.1 放大电路的方框图

若仅研究信号的作用，则可将放大电路看成为一个匣子，其输入端和输出端各为一个端

口,也就是说,可把放大电路看成为一个两端口有源网络,如图 1-3 所示,从输入端看进去可等效为一个电阻;从输出端看进去可等效为一个有内阻的电压源。图中 v_s 为正弦信号源, R_s 为信号源内阻; v_i 是在 v_s 作用下,放大电路输入端获得的电压,称为输入电压; i_i 为信号源流进放大电路的电流,称为输入电流; R_L 为放大电路的负载电阻,是放大电路的驱动对象; v_o 是负载上的电压,称为输出电压; i_o 是从输出端流出的电流,称为输出电流。

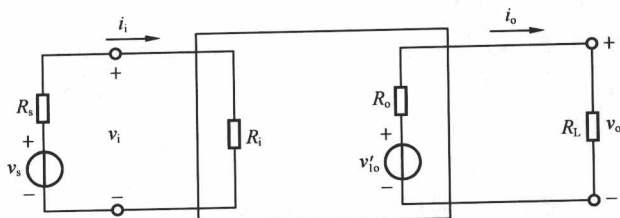


图 1-3 放大电路方框图

1.4.2 放大电路的性能指标

1.4.2.1 放大倍数

放大倍数是直接衡量放大电路放大能力的重要指标,其值为输出量 X_o (v_o 或 i_o) 与输入量 X_i (v_i 或 i_i) 之比。

电压放大倍数是输出电压 v_o 与输入电压 v_i 之比,即:

$$A_{uu} = A_u = \frac{v_o}{v_i} \quad (1-1)$$

1.4.2.2 输入电阻和输出电阻

放大电路与信号源相连接就成为信号源的负载,输入电阻 R_i 是从放大电路输入端看进去的等效电阻,定义为输入电压有效值 v_i 和输入电流有效值 i_i 之比,即:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (1-2)$$

任何放大电路输出都可以等效成一个有内阻的电压源,从放大电路输出端看进去的等效内阻称为输出电阻 R_o 。设 v'_o 为空载时的输出电压有效值, v_o 为带负载后的输出电压有效值,则:

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} v'_o$$

输出电阻
$$R_o = \left(\frac{v'_o}{v_o} - 1 \right) R_L \quad (1-3)$$

1.4.2.3 通频带

通频带用于衡量放大电路对不同频率信号的放大能力。由于放大电路中电容、电感及晶体器件结电容等电抗元件的存在,在输入信号频率较低或较高时,放大倍数的数值会下降并产生相移。通常,作为放大电路性能指标的放大倍数是指中频放大倍数,图 1-4 所示为某放大电路放大倍数与信号频率的关系曲线,称为幅频特性曲线。信号频率降低,会使放大器的放大倍数随之降低,当放大倍数值下降到最大值 $|A_m|$ 的 0.707 倍时的频率称为下限截止频率 f_L ;

随着信号频率从 f_L 开始升高, 放大器的放大倍数也会逐渐升高, 当信号频率升高到某一频率 f_0 时, 放大倍数达到最大值, 信号频率从 f_0 处继续升高, 放大器的放大倍数又开始下降, 当放大倍数的数值下降到约等于最大值 $|A_m|$ 的 0.707 倍时的频率则称为上限截止频率 f_H , f 小于 f_L 的部分称为放大电路的低频段, f 大于 f_H 的部分称为高频段, 而 f_L 与 f_H 之间的部分称为中频段, 也称为放大电路的通频带 f_{BW} 。

$$f_{BW} = f_H - f_L \quad (1-4)$$

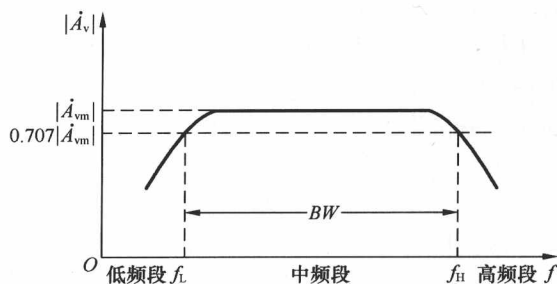


图 1-4 放大电路的幅频特性

1.4.2.4 最大不失真输出电压

最大不失真输出电压是在不失真的前提下能够输出的最大电压, 即当输入电压再增大就会使输出波形产生非线性失真时的输出电压。一般用有效值 v_{om} 表示。

1.4.2.5 最大输出功率与效率

在输出信号不失真的情况下, 负载上能够获得的最大功率称为最大输出功率 P_{om} , 此时, 输出电压达到最大不失真输出电压。

放大电路中供电的直流电压能量的利用率称为效率 η , 设电源消耗的功率为 P_V , 则效率 η 等于最大输出功率 P_{om} 与 P_V 之比, 即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} \quad (1-5)$$

1.5 小结

在本章中主要讨论了什么是电信号, 在实际应用中常将非电的物理量转换成电信号, 在电子电路中则将信号分为模拟信号和数字信号, 并且介绍了电子系统的组成, 重点介绍放大电路的基本概念及性能指标。

习题

1. 信号是反映_____的物理量, 电信号是指随_____而变化的电压或电流。
2. 模拟信号在时间和数值上均具有_____性, 数字信号在时间和数值上均具有_____性。
3. 模拟电路是处理_____信号的电路。
4. 构成具有各种功能模拟电路的基本电路是_____。

第2章 半导体材料、二极管及二极管电路

半导体器件是近代电子学的重要组成部分，只有掌握了半导体器件的结构、性能、工作原理和特点，才能正确选择和合理使用半导体器件。半导体器件具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性强等优点，在各个领域中得到了广泛的应用。

半导体二极管(Diode)是最常用的半导体器件之一，它是一种由PN结构成的电子器件。PN结是由P型半导体和N型半导体有机结合而形成的。图2-1所示为半导体二极管的内部结构示意图及相应的电路符号。其中，接到P型半导体的引线称为正极(或阳极)；接到N型半导体的引线称为负极(或阴极)。

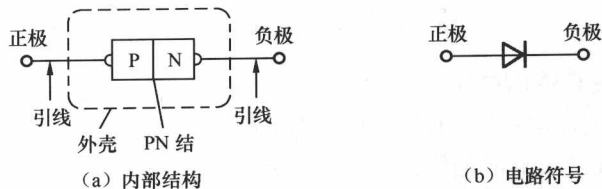


图 2-1 二极管内部结构示意图及相应的电路符号

半导体二极管的主要特性是单向导电性。当外加正向电压，即将直流电源的正端和负端分别接半导体二极管的正极和负极时，半导体二极管导通，流过管子的电流很大；而当外加反向电压，即将直流电源反接时，半导体二极管截止，流过管子的电流很小。这种允许一个方向电流顺利流通的特性称为单向导电性。半导体二极管电流符号中的箭头方向就是表示正向电流的流通方向。

本章首先介绍半导体物理基础知识，而后详细讨论PN结的基本特性，并在此基础上，重点介绍半导体二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数以及应用电路，为后面各章的学习打下基础。

2.1 半导体基础知识

自然界中的各种物质，按其导电能力划分为导体、绝缘体和半导体。半导体(Semiconductor)是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，它的电阻率在 $(10^{-3} \sim 10^9) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。在自然界中属于半导体的物质很多，用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。其中硅用得最广泛，它是当前制作集成器件的主要材料；而砷化镓主要用来制作高频高速器件。

2.1.1 本征半导体

物质的导电性能决定于原子结构，原子是由带正电荷的原子核和分层围绕原子核运动的电子组成。其中，处于最外层的电子称为价电子(Valence Electron)，元素的许多物理和化学性质

都与价电子有关。导体一般为低价元素，它们的最外层电子极易挣脱原子核的束缚成为自由电子，在外电场的作用下产生定向移动，形成电流。高价元素（如惰性气体）或高分子物质（如橡胶），它们的最外层电子受原子核束缚力很强，很难成为自由电子，所以导电性极差，成为绝缘体。硅和锗的原子结构模型分别如图 2-2 (a) 和 (b) 所示。它们都有 4 个价电子，同属于 4 价元素。为了简化起见，常常把内层电子和原子核看做一个整体，称为惯性核 (Inert Ionic Core)，惯性核的周围是价电子。显然，硅和锗的惯性核模型是相同的，它们的惯性核都带有 4 个正的电子电荷量 (+4q)。它们的最外层电子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那么紧，因而其导电性介于导体和绝缘体之间。

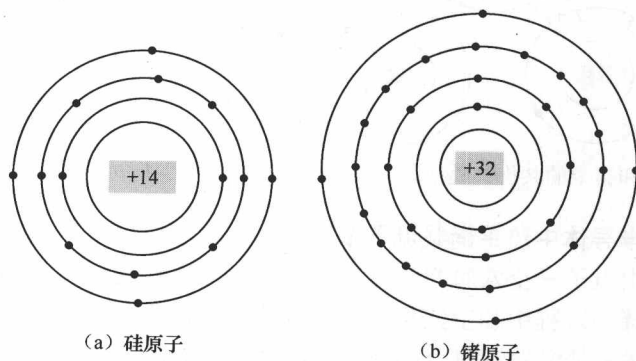


图 2-2 硅和锗的原子结构模型

在形成半导体结构的半导体中人为地掺入特定的杂质元素后，其导电性能具有可控性；并且，在光照和热辐射条件下，其导电性还有明显的变化；这些特殊的性质就决定了半导体可以制成各种电子器件。

2.1.1.1 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体 (Intrinsic Semiconductor)。纯净的硅和锗都是半导体，它们的原子都是有规则地排列着，并通过由价电子组成的共价键把相邻的原子牢固地联系在一起。共价键 (Covalent Bond) 就是相邻两个原子中的价电子作为共用电子对而形成的相互作用力。硅和锗中的每个原子均和相邻 4 个原子构成 4 个共价键，如图 2-3 所示。整块半导体内部晶格排列完全一致的半导体称为单晶。硅和锗的单晶都是本征半导体，它们是制造半导体器件的基本材料。

2.1.1.2 本征半导体中的两种载流子

一块本征半导体，在热力学温度 $T=0\text{K}$ (K 为开尔文) 和没有外界影响的条件下，它的价电子均束缚在共价键中，不存在自由运动的电子。但当温度升高或受到光线照射时，某些共价键中的价电子从外界获得足够的能量，从而挣脱共价键的束缚，离开原子而成为自由电子 (Free Electron)，同时，在共价键中留下了相同数量的空位，这种现象称为本征激发。

当共价键中留下空位时，相应原子就带有一个电子电荷量的正电，邻近共价键中的价电子受它的吸引很容易跳过去填补这个空位，这样，空位便转移到邻近共价键中去；而后，新的空位又被其相邻的价电子填补。这种过程持续进行下去，就相当于一个空位在晶格中移动，如图 2-4 所示。由于带负电荷的价电子依次填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向云的效果相同，因此，可以把空位看作带正电荷的载流子，并把它称为空穴 (Hole)。可见，半导体借以导电的载流子比导体多了一种空穴，换句话说，半导体是依靠自由电子和空穴两种载

流子导电的物质，这是半导体导电的特殊性质。

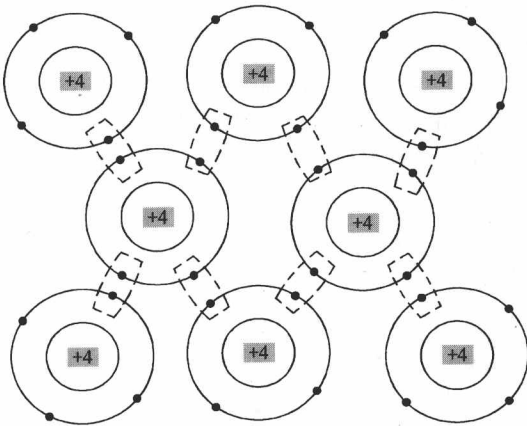


图 2-3 硅和锗中的共价键模型

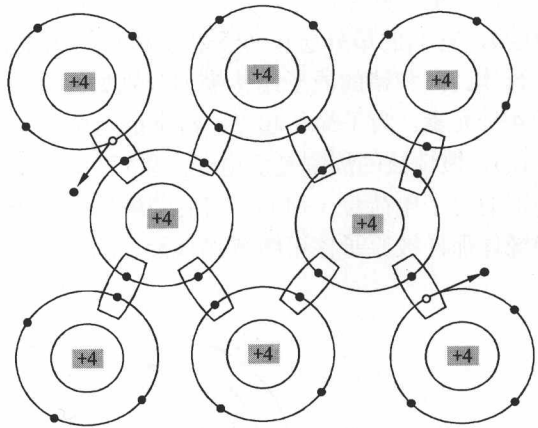


图 2-4 半导体中的电子和空穴

2.1.1.3 本征半导体中热平衡载流子浓度

实际上，在自由电子—空穴对产生过程中还同时存在着复合（Recombination）过程，这就是自由电子在热骚动过程中和空穴相遇而释放能量，造成自由电子—空穴对消失的过程。当温度一定时，上述本征激发和复合的载流子浓度值（Intrinsic Concentration，即单位体积内的载流子数）达到动态平衡。可以证明，这个热平衡载流子浓度值 n_i （自由电子浓度值或空穴浓度值）为

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

单位为 cm^{-3} 。式中， A 是常数（硅为 $3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ ；锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ ）， k 是玻尔兹曼常数（ $8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ， J 为焦耳）， E_{g0} 是 $T=0\text{K}$ 即 -273°C 时的禁带宽度（硅为 1.21eV ，锗为 0.785eV ）。

由上式可知， n_i 与温度有关，随温度升高而迅速增大。在室温（ $T=300\text{K}$ ）时，求得硅的 $n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，锗的 $n_i \approx 2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。必须指出， n_i 的数值虽然很大，但它占原子密度很小的百分数。例如，硅的原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ，因此， n_i 仅为它的三万亿分之一。可见，本征半导体的导电能力是很低的（本征硅的电阻率约为 $2.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ）。

2.1.2 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（Doped Semiconductor）。按掺入的杂质不同，杂质半导体分为 N 型和 P 型两种。若掺入 5 价元素的杂质（磷、锑或砷等），则可使半导体中的自由电子浓度大大增加，故将这种杂质半导体称为 N 型或电子型半导体。若掺入 3 价元素的杂质（硼、镓铟或铝等），则可使半导体中的空穴浓度大大增加，故将这种半导体称为 P 型或空穴型半导体。

2.1.2.1 N 型半导体

在纯净的硅半导体中掺入 5 价元素，5 价元素的原子有 5 个价电子，当它顶替晶格中的 4 价硅原子时，每个 5 价元素原子中的 4 个价电子与周围 4 个硅原子以共价键形式相结合，而余下的一个就不受共价键束缚，它在室温时所获得的热能足以使它挣脱原子核的吸引而变

成自由电子,如图 2-5 所示。由于该电子不是共价键中的价电子,因而不会同时产生空穴。而对于每个 5 价元素原子,尽管它释放出一个自由电子后变成带一个电子电荷量的正离子,但它束缚在晶格中,不能像载流子那样起导电作用。这样,与本征激发浓度相比,N 型半导体中自由电子浓度大大增加了,而空穴与自由电子相遇而复合的机会增大,其浓度反而更小了。因此,在上述 N 型半导体中,将自由电子称为多数载流子,简称多子 (Majority Carriers);空穴称为少数载流子,简称少子 (Minority Carriers)。并将 5 价元素称为施主 (Donor) 杂质,它是受晶格束缚的正离子。N 型半导体主要靠自由电子导电,掺入的杂质越多,多子 (自由电子) 的浓度就越高,导电性能也就越强。

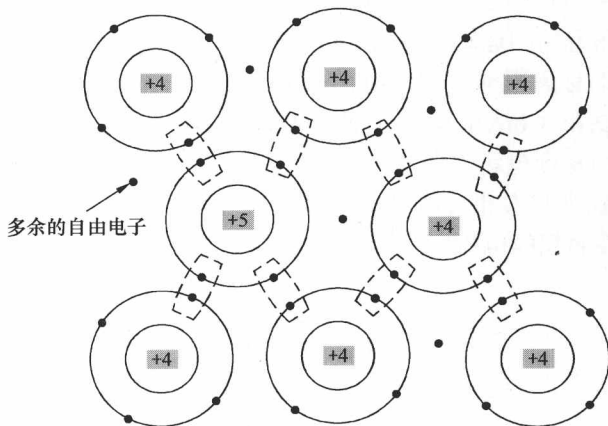


图 2-5 N 型半导体

2.1.2.2 P 型半导体

在纯净的硅半导体中掺入 3 价元素,3 价元素原子有 3 个价电子,当它顶替 4 价硅原子时,每个 3 价元素原子与周围 4 个硅原子组成的 4 个共价键中必然缺少一个价电子,因而形成一个空穴,如图 2-6 所示。显然,这个空穴不是释放价电子形成的,因此它不会同时产生自由电子。可见,在 P 型半导体中,空穴是多子,自由电子是少子。每个 3 价元素原子形成的空穴由相邻共价键中的价电子填补时,本身便变成带一个电子电荷量的负离子,故相应地将 3 价元素称为受主 (Acceptor) 杂质。

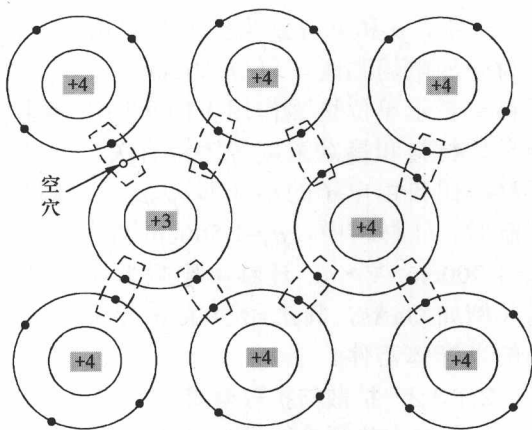


图 2-6 P 型半导体

通过上述讨论可见,不论 P 型或 N 型半导体,掺杂越多,多子数目就越多,少子数目就越少。且少量掺杂 (其浓度值 $8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 远低于硅原子密度 $4.96 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$),载流子就会有几个数量级的增加 (10^{10} 增加到 10^{16} 量级),这就表明它的导电能力显著增大。在杂质半导体中,多子浓度近似等于杂质浓度,其值几乎与温度无关。而少子浓度却随温度升高而显著增大,直达少子浓度增大到与多子浓度相当,杂质半导体又回复到类似的本征半导体。以后将会看到,少子浓度的温度敏感特性是导致半导体器件温度特性差的主要原因。掺入不同的杂质就能改变杂质半导体的导电类型,这是制

造 PN 结的一种主要方法。

2.1.3 两种导电机理——漂移和扩散

半导体和导体不同，导体中只有自由电子一种载流子，它在电场作用下产生定向的漂移运动，形成漂移电流。而半导体中有自由电子和空穴两种载流子，它们除了在电场作用下形成漂移电流外，还会在浓度差的作用下产生定向的扩散运动，形成相应的扩散电流。

2.1.3.1 漂移与漂移电流

在外加电场作用下，载流子将在热骚动状态下产生定向的运动，其中自由电子产生逆电场方向的运动，空穴产生顺电场方向的运动，如图 2-7 所示。载流子的这种定向运动称为漂移运动，由它产生的电流称为漂移电流（Drift Current），而且两种载流子所对应的漂移电流均是顺电场方向的。

若设 J_{pt} 和 J_{nt} 分别为空穴和自由电子的漂移电流密度（即通过单位截面积的电流），则它们可分别表示为：

$$J_{pt} = q p \mu_p E \quad (2-2)$$

$$J_{nt} = -(-q) n \mu_n E \quad (2-3)$$

总的漂移电流密度为：

$$J_t = J_{pt} + J_{nt} = q(p \mu_p + n \mu_n) E \quad (2-4)$$

式中， p 和 n 分别为空穴和自由电子的浓度， $q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ （库仑）是电子电荷量， E 为外加电场强度，单位 V/cm ， μ_p 和 μ_n 分别为空穴和自由电子的迁移率（Mobility）。迁移率表示单位场强作用下的平均漂移速度，单位 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，其值与温度、载流子性质、半导体材料和掺杂浓度等因素有关。温度越高，掺杂浓度越大，迁移率就越小；空穴的迁移率比自由电子的小（即 $\mu_p < \mu_n$ ）；硅材料中的载流子迁移率比锗材料中的小。例如在室温时，硅材料中， $\mu_n=1\,500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ， $\mu_p=600 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，锗材料中， $\mu_n=3\,900 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ， $\mu_p=1\,900 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。迁移率影响半导体器件的工作速度和工作频率，采用迁移率大的材料（例如 GaAs，其 $\mu_n=8\,500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ， $\mu_p=400 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）可以制成工作速度或工作频率高的半导体器件。

2.1.3.2 扩散与扩散电流

扩散与由热骚动造成的随机运动有关。在一块处于热平衡状态的半导体中，均匀分布的自由电子和空穴不会因随机运动而造成电荷的定向流动。但是，若某种原因破坏了热平衡条件，且出现的非平衡载流子的分布是不均匀的，假设它们的浓度值沿 x 方向连续减小，如图 2-8 所示，则半导体中任一假想面两侧存在浓度差，处于热骚动的载流子就会往返不断地穿越假象面。其中从浓度大的依次穿越假象面进入浓度小的一侧的载流子将多于沿反方向运动的载流子，因此造成载流子沿 x 方向的净流动。这种因浓度差引起载流子的定向运动称为扩散运动。相应产生的电流称为扩散电流（Diffusion Current）。

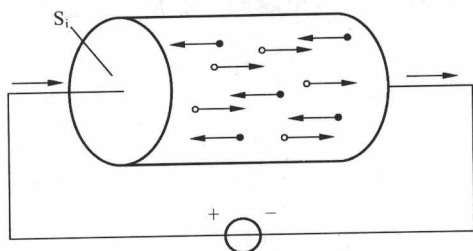


图 2-7 漂移电流的形成