



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

模拟集成电路基础

(第三版)

路 勇 主编
刘 颖 副主编

武科大图书馆



A1075881

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家电工电子基地系列教材

模拟集成电路基础

(第三版)

路 勇 主 编

刘 颖 副主编

侯建军 主 审



武科大图书馆



A1075881

中 国 铁 道 出 版 社

2010年·北京

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家规划教材和国家电工电子基地系列教材。本书是在《模拟集成电路系统》第一、二版的基础上进行修订的,内容包括晶体二极管及应用电路、晶体三极管及应用电路、场效应管及基本放大电路、放大电路的频率响应、负反馈放大电路、双极型模拟集成电路、双极型模拟集成电路的分析与应用、MOS 模拟集成电路、直流稳压电源电路、电子电路的计算机辅助设计等。

本书可作为高等学校电气信息类各专业及相近专业的本科生的理论教材,也可作为电子技术专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路基础 / 路勇主编. —3 版. —北京:

中国铁道出版社, 2010.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-11371-1

I. ①模… II. ①路… III. ①模拟集成电路—高等学校—教材 IV. ①TN4631.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 120803 号

书 名: 模拟集成电路基础 (第三版)

作 者: 路 勇 主编

责任编辑: 武亚雯 李慧君 电话: 010-51873133 电子信箱: tdjc701@126.com 教材网址: <http://www.tdjiaocai.com>

封面设计: 冯龙彬

责任校对: 孙 玫

责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京大兴县新魏印刷厂

版 次: 1991 年 1 月第 1 版 1998 年 6 月第 2 版 2010 年 8 月第 3 版 2010 年 8 月第 6 次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 21 字数: 517 千

书 号: ISBN 978-7-113-11371-1

定 价: 40.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电 (010) 51873170, 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504, 路电 (021) 73187

第三版前言

随着电子技术的飞速发展,电子技术呈现出了系统集成化、设计自动化、用户专用化、测试智能化的发展趋势。为适应全国面向 21 世纪教学内容和教学体制改革的要求,迎接新世纪知识更新速度加快的挑战,各学科的各个教学环节都要有与之相适应的新内容和新方法;加之新的教学基本要求的诞生,教材内容应该作相应的改变以适应新形势的要求。

基于面向 21 世纪电工电子系列课程体系与内容的改革成果,基于多年的教学实践,我们将强调分立与集成的有机结合、技术理论与工程实践相融合、技术理论与计算机方法相融合以及基础技术理论与现代电子技术相融合应作为编写本教材的出发点。编写本教材的基本思想如下。

1. 明确本课程的定位,教材内容必须注重基础知识的介绍,即着重基本概念、基本原理和基本分析方法的介绍。这些基础知识点是电子技术在发展过程中长时期起作用的重要理论和基本技术。在注重基础内容的同时,也必须反映电子信息技术的最新发展(集成电路以及 EDA 技术)及发展趋势,另外在分析方法上也加入了模型的概念,利于今后与系统分析接轨。

2. 内容安排上力求符合认知规律,以管路结合为基本的出发点,突出电子器件的原理以及电子电路的基本原理、分析方法及应用。介绍管子的原理以及参数后,介绍其应用,由于每个管子的特点、参数要求均在具体的使用中才能体现出来,能使读者很快地将器件的原理特点与电路结合起来,对电子器件性能有一个完整的认识。

3. 为了突出教学的基本要求,每章的开头都摘要了本章的重点以及基本知识点,使读者明确学习目标。

4. 通过建立集成化的体系,介绍简单集成工艺、通用和专用集成器件,使读者了解集成电路的设计特点、模拟集成电路的结构以及基本单元电路在集成电路与系统中的应用,为以后设计与应用模拟集成电路芯片奠定基础。

5. 配合各章的主要内容,配备较多层次不同、不同类型的习题,从第三章开始还增设了机辅分析和设计题,以使读者提高综合应用已学知识分析问题的能力。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规范教材,并为国家电工电子基地系列教材之一。本书由路勇主编,刘颖副主编。全书共分为 11 章,其中第 2 章、第 3 章 3.1 节、第 4 章由曾涛编写,第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 11 章 11.1 节与 11.3 节、第 3 章 3.2 节由路勇编写,第 10 章、第 11 章 11.2 节由任希编写。最后路勇对全书进行了文字润饰和定稿。

北京交通大学侯建军教授主审了全稿,并提出了许多宝贵的意见。

教材编写过程中得到了冯民昌教授(第二版教材的主编,原课程组的负责人)大量的无私的帮助,在此表示衷心的感谢!另有黄亮老师在本书的核校及习题演算上给予了许多帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2010年8月

第二版前言

《模拟集成电路系统》第一版(范希鲁主编)于1991年出版,第一版书稿写于1989年。自1989年以来电子技术有了很大发展,面向21世纪对技术人材的培养又提出新的要求。为此,本书第二版是在第一版基础上,根据国家教委批准的《电子电路(I)(II)课程教学基本要求》考虑到技术发展和人材培养的要求进行了修订。

第二版全书共十一章,第一章绪论简要介绍信息传输的基本方法,发送和接收系统组成框图;第二至第七章介绍模拟通信系统常用的基本功能电路,包括调谐放大器,高频功率放大器、振荡器、调幅与检波、调角与解调、混频,其中突出了模拟集成乘法器在调制解调等频率变换电路中的作用;考虑到现代数字通信的发展,第八、九章介绍了模拟信号数字化及数模转换器,数字调制解调技术;第十章反馈控制系统介绍AGC、AFC、PLL电路原理,为了避免与“通信系统原理”课程内容重复,本书只介绍电路组成原理,不讨论通信系统的特性、指标;本书第十一章是模拟电子系统举例,主要是综合以上各章单元电路组成实用模拟电子系统,以便加深对单元功能电路的理解,同时建立系统的概念。

本教材适合70~80学时的教学时数。为了不增加篇幅,本书删除了第一版中非线性电路与时变参量电路的分析方法,仅保留了参量分析,并将其融入到有关章节的电路分析中;为了加强学生用计算机辅助设计和分析电路能力,各章增加了一些机辅分析题,供学生上机练习。

本书由北方交通大学冯民昌教授主编并编写了第五、六、七、八、九、十一章,李金平副教授编写了第一、二、三、四、十章。

本书承范希鲁教授主审,并为本书的编写提出了许多宝贵意见。清华大学董在望教授、北京邮电大学谢沅清教授、北京理工大学罗伟雄教授、北京工业大学谭慕端教授对本书编写提出了评审意见,他们对本书编写作出了宝贵贡献,特此一并致谢。

作 者

1997年11月
于北方交通大学

第一版前言

本书是根据国家教委 1987 年正式颁布的高等工科院校《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》而编写的。书中力求贯彻“以集成电路为主的原则,并突出各种功能电路的组成、工作原理、性能特点及其分析方法”。本书可作为电子技术、通信、控制等专业的本科生教材,若舍去某些内容,也可作为相应专业的大专班或夜大学的教材。

本书是在考虑到近年来高频电路的发展、并结合我们的教学实践而编写的。由于学时的限制,本书力求控制篇幅,删减了陈旧的内容和繁琐的推导,围绕各个功能单元来讲清基本概念和基本分析方法。考虑到目前高频电子电路中集成电路还不能完全取代分立元件电路,并且,集成电路是从分立电路的基础上发展起来的,因此从分立电路开始讨论能够更清楚地阐明基本原理,也更容易理解和接受。故在本书各章中,先从分立元件出发分析电路,然后再介绍有关的集成电路芯片,并强调了集成系统的组成和应用。

在第一章中,对调谐回路和阻抗变换方面作了一些复习和讨论,如学生已有这方面的基础,则可略去。在第二章中,对非线性电路和时变参量电路的特点和分析方法,作了集中和加强的叙述。第三章讨论高频功率放大器,第四章分析正弦振荡器。第五、六、七三章讨论调幅、调频和混频,其中强调利用模拟乘法器和集成调制解调器来实现各种频率变换。第八章着重介绍锁相技术的原理、集成锁相电路及其在各方面的应用。书中注有*的章节,可由任课教师决定取舍。

本书由北方交通大学范希鲁主编。绪论和第二、四、五、六、七等章由范希鲁编写,第一、三、八等章由卢淦编写。本书由上海铁道学院黄大卫教授、方向副教授担任主审,他们提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

编者

一九八九年七月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 电子系统的基本概念	2
1.3 模拟电子系统举例	4
复习思考题	4
第 2 章 晶体二极管及应用电路	6
2.1 半导体基础知识	6
2.2 晶体二极管	15
复习思考题	26
第 3 章 晶体三极管及应用电路	29
3.1 晶体三极管	29
3.2 晶体三极管放大电路	40
复习思考题	58
第 4 章 场效应管及基本放大电路	65
4.1 场效应管概述	65
4.2 场效应管的基本放大电路	77
复习思考题	86
第 5 章 放大电路的频率响应	90
5.1 频率响应的基本概念	90
5.2 频率响应的分析方法	91
5.3 晶体三极管的高频运用	96
5.4 单管共射放大电路的频率响应	99
5.5 多级放大电路的频响	105
复习思考题	107
第 6 章 负反馈放大电路	110
6.1 反馈的基本概念	110
6.2 反馈放大器的分类及其判别方法	112
6.3 负反馈对放大器性能的影响	117
6.4 负反馈放大器的分析方法	125
6.5 负反馈放大器的稳定性及其相位补偿	129
6.6 负反馈放大器实例	136
复习思考题	138
第 7 章 双极型模拟集成电路	145
7.1 集成化元器件的工艺特点	145

7.2	集成电路的基本结构及特性	148
7.3	电流源电路及基本应用	151
7.4	差分放大电路	155
7.5	低频功率放大电路	168
7.6	模拟集成运算放大器	175
	复习思考题	184
第8章	双极型模拟集成电路的分析与应用	190
8.1	线性应用及理想运放模型	190
8.2	基本运算电路	192
8.3	电压比较器	201
8.4	波形发生电路	204
8.5	集成运算放大器的其他应用	210
	复习思考题	218
第9章	MOS 模拟集成电路	224
9.1	MOS 场效应管的特点	224
9.2	MOS 场效应管的模型	225
9.3	MOS 管恒流源负载	226
9.4	MOS 管电流源	228
9.5	MOS 单级放大电路	230
9.6	MOS 管差分放大电路	236
9.7	CMOS 互补功率放大电路	237
9.8	MOS 模拟开关	238
	复习思考题	244
第10章	直流电源电路	249
10.1	直流稳压电源概述	249
10.2	整流电路	250
10.3	滤波电路	255
10.4	稳压电路	260
	复习思考题	268
第11章	电子电路的计算机辅助设计	274
11.1	引言	274
11.2	电子工作台 Multisim 简介	274
11.3	Pspice 仿真模型的建立及应用	307
附录	常用符号说明	324
	参考文献	327

第 1 章

绪 论

【内容提要】 本章作为绪论,首先介绍电子技术的发展历程,然后介绍电子系统的功能、组成原则、分类以及放大电路的基本概念,最后通过模拟电子电路系统实例,向读者介绍模拟电子电路主要的研究内容。本章的目的是使读者明确本课程的地位、学习本课程的主要目的,为后续各章的学习奠定基础。

1.1 引 言

由电子器件(二极管、三极管、场效应管、集成运放等)组成并完成一定功能的电路称为电子电路,组成电子电路的目的,是为了对信号进行传输、处理或用来产生某些信号。

随着科学技术的发展,电子电路应用范围极其广泛,如:无线电通信、计算机科学、自动控制等各个科学技术领域,电子制造业成为当今世界最具有发展前途的产业。

电子电路的发展是与电子器件的发展紧密结合的。随着电子器件的不断更新,电子电路的发展史经历了以下几个阶段。

1906 年真空三极管诞生,用它构成的电子电路,能够产生从低频到微波范围的振荡,可以放大各种微弱的信号,从而使电子电路技术进入了实际应用阶段。

20 世纪 40 年代末,用半导体材料做成了第一只晶体管,叫做半导体器件或固体器件(solid-state device),1951 年有了商品,这是出现分立元件的又一个里程碑。由于晶体管具有体积小、重量轻、功耗低、工作可靠性高等一系列优点,因而,它在许多领域中取代了电子管。电子电路技术也因此进入了晶体管电路的历史阶段。

20 世纪 50 年代末,研制出了集成电路。它是在一块小的基片上光刻制造出多个晶体管、电阻和电容等器件,并将它们连接成能够完成一定功能的电子电路。起初,单片集成的元、器件较少,称为小规模集成电路(SSI);以后单片集成的晶体管数目逐年递增,相继出现中规模集成电路(MSI),其单片含数百只晶体管;20 世纪 60 年代末制成单片含有数千只晶体管的所谓大规模集成电路(LSI);20 世纪 70 年代中期,又制成了单片含有数万只晶体管的超大规模集成电路(VLSI),目前,单片集成度已达数千万个元、器件,从而可使得将器件、电路与系统融合于一体,构成一个集成电子系统。今后单片集成度将以什么样的速度发展?摩尔定律作出的回答是:今后十几年内,单片可集成的晶体管数目将以每 14 个月翻一番的速度递增。

由于大规模和超大规模集成电路的出现,电子电路的技术装置发生了根本变化。电子设备在功能、速率、体积、功耗、可靠性诸方面都取得了惊人的成就。这是一次意义深远的技术革命,电子科学技术的发展进入了“微电子学”时代。

目前电子技术的应用已经渗透到人类生活和生产的各个方面。西方学者把电子技术的

应用归纳为四个方面,或者叫做四个“C”。有两种说法:一种是元器件(Components)制造工业、通信(Communication)、控制(Control)和计算机(Computer);另一种说法是通信、控制、计算机和文化生活(Cultural life,如广播、电视、录音、电化教学、电子文体用具、电子表等),并且用四个“C”的发展水平来衡量一个国家的现代化程度,可见电子技术在现代社会中的重要性。

按照电子电路的不同功能和构成原理,可将它们划分为模拟电子电路和数字电子电路两大类型。

模拟电子线路是对模拟信号进行传输或处理的电路。所谓模拟信号是指信号的幅值随时间是连续变化的,具有连续性,大多数物理量均为模拟信号,如图 1-1 所示。由图示波形可知,信号可以取一定范围内的任意值,而且任何瞬间的任何值均是有意义的。

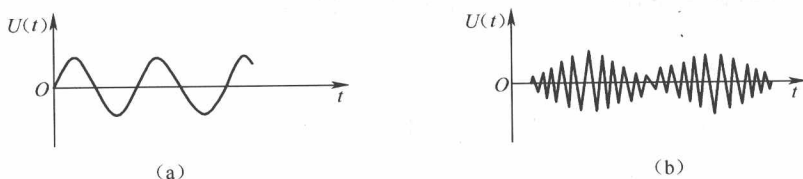


图 1-1 模拟信号波形图

模拟电路主要研究的问题是对信号的放大,有功能和性能各异的放大电路,而其他功能的模拟电路多以放大电路为基础。

数字电子线路是对数字信号进行传输或处理的电路。所谓数字信号是指信号在时间、取值上都是离散的、不连续的。如图 1-2 所示。例如在规定的時間间隔上只按高、低两个电平取值的数字信号。

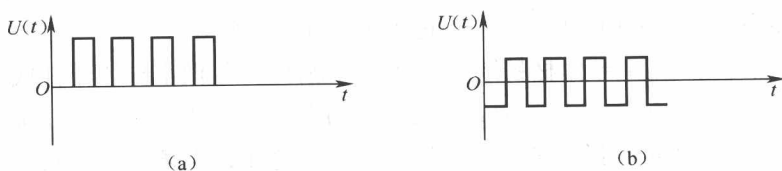


图 1-2 数字信号的波形图

数字电路主要研究的问题是数字逻辑的电路实现方法。

当然,有许多电子系统,往往兼做模拟信号与数字信号的处理工作,这样,便出现了模拟与数字混合的电路与系统。

1.2 电子系统的基本概念

电子信息系统简称为电子系统。下面简要介绍模拟电子系统的主要组成部分、各部分的功能,以及电子系统的设计原则,并给出模拟电子系统的典型实例。

1.2.1 模拟电子系统的基本构成

图 1-3 为模拟电子系统的示意图。系统首先要采集信号,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,或来源于用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幅度一般很小,噪声很大,且易受干扰,有时难以区分信号和噪声,因此,在加工信号之前需要进行预处理。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,再进行运算、比较、采样保持等不同处理。最后,一般需要经过功率放大使信号具有一定的驱动能力来驱动执行机构或者模数转换变为数字信号,以方便计算机接受,进行进一步的处理。

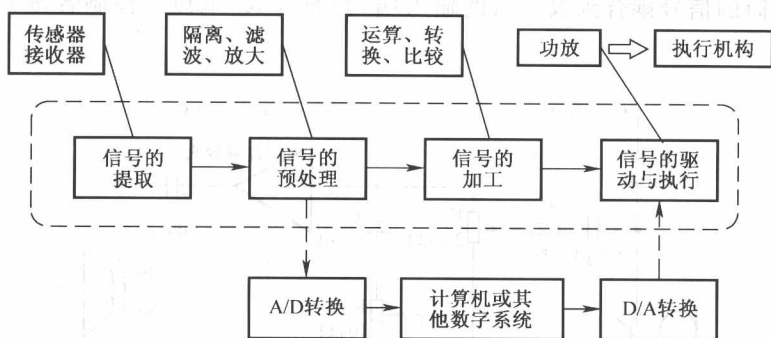


图 1-3 电子系统的示意图

图 1-3 中虚线的部分一般由模拟电路来实现,称为模拟电子系统;计算机或其他数字系统部分由数字电路来实现,称为数字电子电路(系统);A/D 转换和 D/A 转换部分属于模拟—数字混合电子电路。由此可知,一般的电子系统均有模拟电路和数字电路配合完成,二者成为一个整体。

1.2.2 模拟电子系统的构成原则

在设计电子系统时,不仅要实现预期功能和性能指标,还要考虑系统的阻抗特性、可靠性和可测试性。所谓可靠性是指系统在工作环境下能稳定运行,具有一定的抗干扰能力,这是电子系统实现基本功能的条件。所谓可测试性包含两个方面,其一是为了调试方便引出合适的测试点,其二为系统设计有一定故障覆盖率的自检电路和测试激励信号,此项可保证系统能方便维护维修的必要条件。

为了使系统设计安全高效,应尽可能做到以下几点。

(1) 必须满足功能和性能指标要求。

(2) 在满足功能和性能指标要求的前提下,电路要尽量简单。因为同样功能的电路,电路越简单,元器件越少,连线和焊点越少,故障出现的概率越小,可靠性越高。因此,设计时能采用集成电路实现的尽量不采用分立器件实现,能用大规模集成电路实现的尽量不采用小规模集成电路实现。

(3) 电磁兼容特性。电子系统不可避免地工作在复杂的电磁环境中,其中既有来自自然的电磁变化,也有生活和工业活动产生的电磁变化。这些均会对电子系统产生不同程度的干扰;而电子系统本身又会成为其他电子设备的干扰源。所谓电磁兼容特性,是指电子系统在预定的环境下,既能抵御周围磁场的干扰,又能较少地影响周围环境。在设计电子系统时,电磁兼容性设计的重点是要研究周围环境电磁干扰的特征以及如何采取必要的措施抑制干扰源或阻断干扰源的传播途径,保证系统的正常工作。

(4) 系统的调试应简单方便, 而且其生产工艺应尽可能简单。

1.3 模拟电子系统举例

作为模拟电子系统的应用实例, 这里给出了如图 1-4 所示实际扩音系统的电原理图。图中 C_3 将放大器输出信号耦合到扬声器(C_3 一般为 $500\ \mu\text{F}$ 的大电容), 同时起到隔直流作用; 用电容 C_1 将话筒的信号耦合到放大器的输入端, 并通过 R_3 电位器控制音量 C_2 、 R_2 、 R_4 组成音调调节网络。

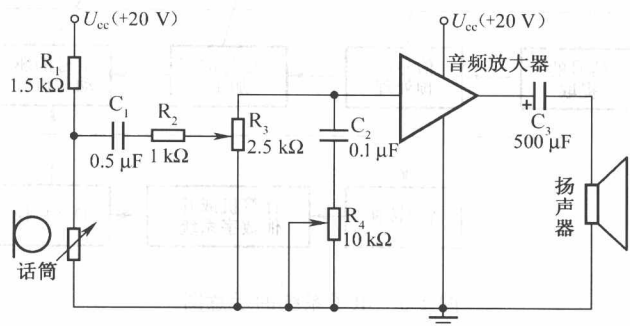


图 1-4 实际扩音系统原理图

对中小功率的扩音系统, 用一块集成电路即可满足放大器要求。对大功率(如 $300\ \text{W}$)的扩音系统, 还需要分立的大功率晶体管组成特殊的输出级电路, 此时集成放大电路只完成低功率放大任务。

随着集成电路技术的飞速发展, 已经可以在单片上集成复杂的模拟电子系统。例如单片调幅/调频接收机集成电路, 它内部集成了高频放大、混频、中频放大、检波、功率放大等电路, 应用时只需外接少量的调谐元件即可构成单片调幅/调频接收机。

从以上讨论可以看出, 模拟电子系统是由模拟集成电路模块和分立元件及其电路组成。

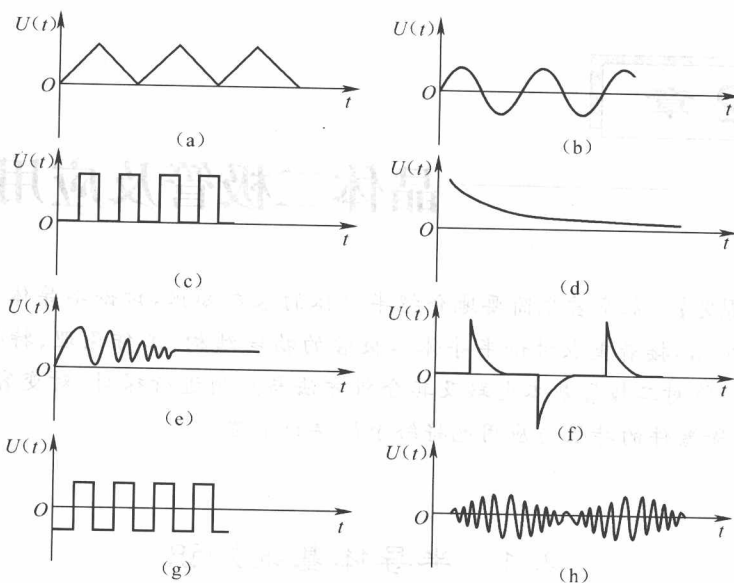
组成模拟集成电路的单元电路, 一部分是在分立元件电路基础上, 经改进构成; 另一部分是随着集成技术的发展出现的新电路。这些单元电路是我们分析掌握各种模拟集成电路的重要基础, 而构成这些单元电路要用到半导体器件。所以, 本书将首先介绍模拟集成电路及其系统用到的基本半导体器件, 以后逐步引入模拟集成电路单元电路的工作原理、分析方法及其应用实例。在此基础上, 讲述较复杂模拟集成电路的原理及其应用。最后介绍现代模拟集成电路技术以及电子设计自动化的有关应用。



复习思考题

习 题

1. 组成电子电路的部分有哪些? 各有什么功能?
2. 电子电路按功能和构成原理不同, 大体分为哪两种类型?
3. 何谓模拟信号? 何谓数字信号? 指出题 1-3 图所给波形哪个是模拟信号, 哪个是数字信号?



题 1-3 图

4. 在设计电子系统时,应做到哪几点?

5. 构成各种模拟电路的最基本电路是什么?

第2章

晶体二极管及应用电路

【内容提要】 本章首先简要地介绍半导体的基本知识,讨论半导体器件的核心环节——PN结,接着重点讨论半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数,最后将对二极管基本电路及其分析方法与应用进行探讨,对变容二极管、肖特基二极管等器件的特性与应用也将给予简要的介绍。

2.1 半导体基础知识

自然界物体按导电能力可分为导体、半导体和绝缘体三类。日常生活中接触到的金、银、铜、铝等金属都是良好的导体,它们的电导率在 $10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级;而塑料、云母、陶瓷等物质都几乎不导电,因此称为绝缘体,它们的电导率在 $10^{-22} \sim 10^{-14} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级;导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,它们的电导率在 $10^{-9} \sim 10^2 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级。目前多数电子器件是利用经过特殊加工且性能可控的半导体材料制造而成。由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛的应用,成为构成电子电路的基本元件。

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有元素半导体例如硅(Si)、锗(Ge)和化合物半导体如砷化镓(GaAs)等,以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中硅和锗用得最广泛,它们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 半导体的特性

半导体之所以成为电子器件的基本材料,是由于半导体具有不同于其他物质的特点,主要有以下特性。

1) 当半导体温度升高时,半导体的导电能力显著增加。温度可明显地改变半导体的电导率,利用这种热敏效应可制成热敏器件,但另一方面,热敏效应使半导体的热稳定性下降。因此,在半导体构成的电路中常采用温度补偿及稳定参数等措施。

2) 当半导体受到外界光照时,导电能力将发生显著的变化。光照不仅可改变半导体的电导率,还可以在某种特殊半导体内产生电动势,这就是半导体的光电效应。利用光电效应可制成光敏电阻、光电晶体管、光电耦合器和光电池等。光电池已在空间技术中得到广泛的应用,为人类利用太阳能提供了广阔的前景。

3) 当在纯净的半导体中加入微量的特定杂质时,半导体的导电能力显著增加。例如,室温 30°C 时,在纯净锗中掺入一亿分之一的杂质(称掺杂),其电导率会增加几百倍。正是因为掺杂

可改变和控制半导体的电导率,才能利用它制造出各种不同的半导体器件。

半导体具有的以上这些特性可总结为热敏性、光敏性和掺杂特性,决定了半导体可以作为电子器件的基础材料。

2.1.2 本征半导体

1. 本征半导体原子模型

完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。半导体的重要物理特性均取决于它的电导率的变化,而电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子的数目有关。载流子的浓度愈高,其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度值及杂质的浓度。

制造电子器件的材料主要是硅和锗,也少量地采用某些氧化物作为材料。半导体硅和锗均需制成晶体,整块晶体内部晶格排列完全一致的晶体称为单晶。硅或锗原子在晶体中是有规则地排列着的,即形成四面体结构,每个原子周围与四个原子在空间上相邻,且位置对称,其原子模型排列的平面示意图如图 2-1 所示。为了简化起见,常把内层电子和原子核看作一个整体,称为惯性核,由于原子呈中性,故离子芯用带圆圈的 $+4$ 符号表示。惯性核的周围是价电子,硅和锗同属于四价元素其原子结构中都有四个价电子(Valence Electron)。显然,硅和锗的惯性核模型是相同的,它们的惯性核都带有四个正的电子电荷量($+4q$)。硅和锗都是四价元素,最外层原子轨道上具有四个电子,称为价电子。一个原子的外层四个价电子与相邻的四个价电子形成共价键(Covalent Bond),由此将相邻的原子牢固地联系在一起。

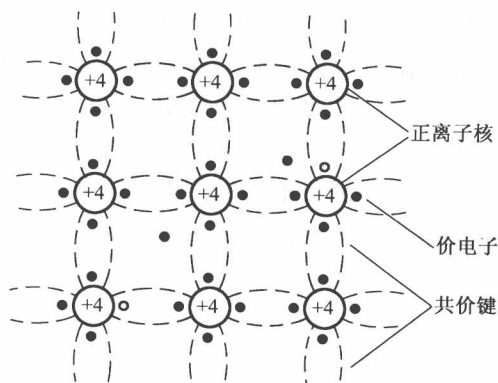


图 2-1 简化原子模型排列示意图

2. 本征半导体两种载流子

在半导体处于绝对温度 $T=0\text{ K}$ 和没有外界激发时,本征半导体内的每一原子的外围电子即价电子被共价键所束缚,不存在自由运动的电子,在外电场作用下这些束缚电子不会形成电流,即此时的本征半导体不会导电。当温度升高或受到光线照射时,处于最外层的价电子中部分价电子从外界获得足够的能量,加剧价电子的布朗运动,从而部分价电子可能挣脱共价键的束缚,脱离共价键而成为自由电子(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,相应原子则需要一个带负电的电子填补在空位处才能达到稳定

状态,因此可将此空位看作是带正电荷的粒子,并称之为空穴(Hole)。本征激发后的自由电子和空穴的示意图如图 2-2 所示。

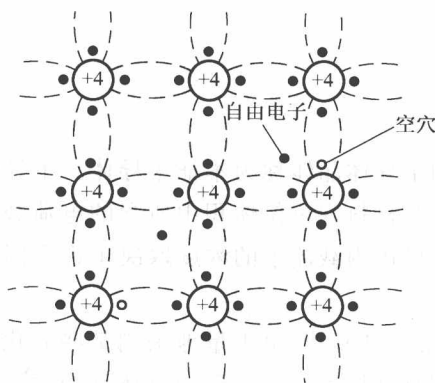


图 2-2 本征半导体中的自由电子和空穴的示意图

由于共价键中出现了空穴,在外加电场作用下,邻近价电子就可能填补到这个空穴上,而在这个电子原来的位置上又留下新的空穴,其他电子又可能转移到这个新的空位。由于电子的移动造成空穴的相对移动,使半导体晶体中出现一定的电荷迁移,从而形成电流,因此可将空穴称为带正电的载流子。

若在本征半导体两端外加一个电场,在外电场 E 的作用下,一方面自由电子将产生定向移动,形成电子电流;另一方面,由于空穴的存在,价电子将按一定的方向依次填补空穴,形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性不同,空穴的移动方向和电子移动的方向是相反的,本征半导体中的电流是两个电流之和。由此可知,本征半导体有两种载流子,即自由电子和空穴,而导体导电只有一种载流子,即自由电子,这是半导体与导体导电的不同之处。

由此可见,本征半导体中产生电流的根本原因是由于半导体内共价键中空穴的出现。空穴可看成是一个带正电的粒子,它所带的电量与电子相等,符号相反,在外加电场作用下可以在半导体中作定向移动。

3. 载流子的浓度

在本征半导体中,一方面本征激发不断产生电子—空穴对,这个过程称为激发;另一方面,自由电子和空穴在运动过程中又会相遇,自由电子填入空穴回到共价键变成价电子,同时释放出能量,电子—空穴对消失,这个过程称为载流子的复合。激发和复合随时产生,当没有外界其他影响并在一定温度下,本征半导体中本征激发产生的电子—空穴对和复合的电子—空穴对数目是相等的,处于动态平衡状态,载流子浓度维持一定的热平衡值。当温度变化时,本征半导体中的电子—空穴对会在新的平衡值下达到新的动态平衡。

当温度一定时,本征激发和复合在某一平衡载流子浓度值(单位体积内的载流子数)上达到动态平衡。可以证明,这个平衡载流子浓度值 n_i (自由电子浓度值或空穴浓度值)为

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

式(2-1)中, n_i 和 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度, A 是常数(硅为 $3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$; 锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$), T 为热力学温度, k 是玻尔兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)