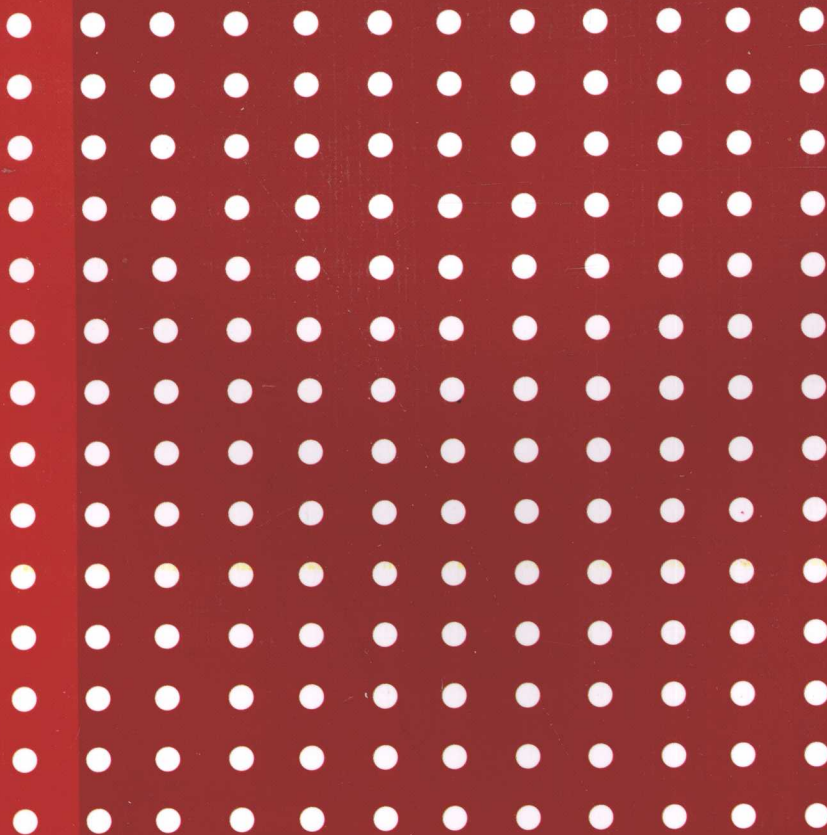


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

模拟电子技术基础教程

魏英 主编

姜钧 杨鸿波 杨飞 李春云 王丽霞 编著



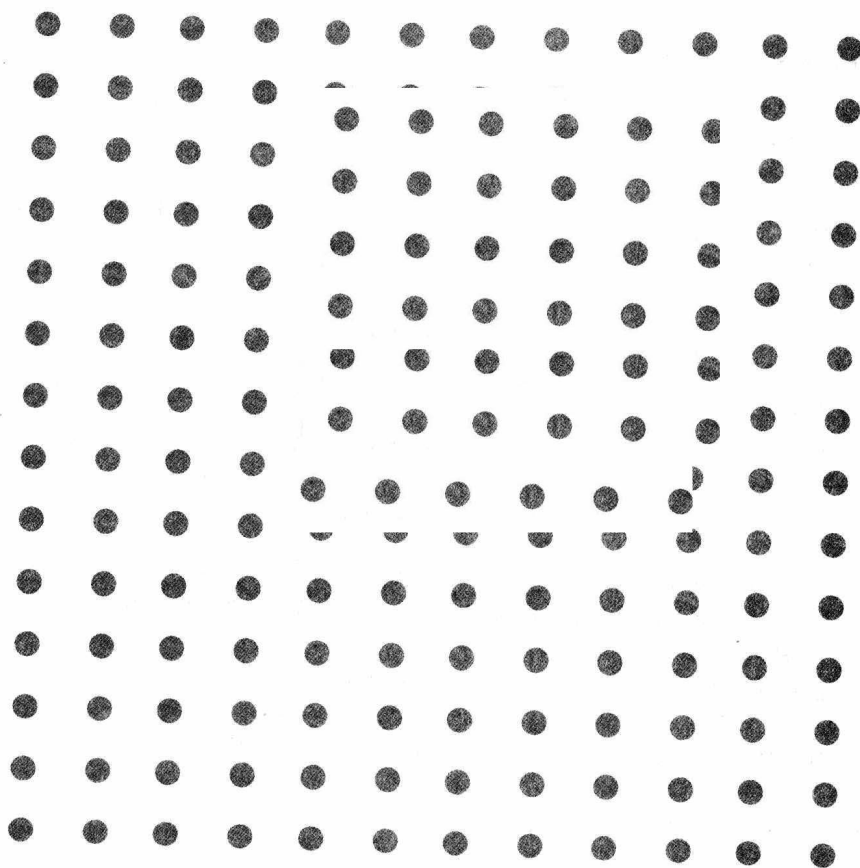
清华大学出版社

21世纪高等学校电子信息工程规

模拟电子技术基础教程

魏英 主编

姜钧 杨鸿波 杨飞 李春云 王丽霞 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以 2004 年教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求为依据,同时兼顾北京信息科技大学对工科电类基础课的要求,结合编者多年的教学经验和讲义编写而成。

全书立足“少学时,重概念,偏集成,兼分立,终应用”,尽量避免复杂的数学推导,强调基本概念和晶体管器件模型,偏重集成电路的教学。全书共 9 章,包括常用的半导体器件及由其组成的基本放大电路、集成运放的构成及其频率响应、放大电路的反馈、波形发生电路、运算电路、滤波电路、功率放大电路及直流电源。另外为了帮助初学者更好地学习模拟课程,在每一章节的最后,均对本章所述的典型电路利用 Multisim 的电路设计软件进行了电路仿真。

本书可作为高等院校工科学生电子技术基础课程教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础教程/魏英主编.--北京:清华大学出版社,2015

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材

ISBN 978-7-302-40435-4

I. ①模… II. ①魏… 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(2015)第 122218 号

责任编辑:刘向威 薛 阳

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.25 字 数:467 千字

版 次:2015 年 11 月第 1 版 印 次:2015 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用的培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合的方法,使产品性价比很高。如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程

设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,可提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

本书以 2004 年教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求为依据编写而成,可作为高等院校工科学生电子技术基础课程教材或参考之用。

多年来,编者所在学校模拟电子技术课程使用的都是童诗白编写的《模拟电子技术基础》,而近年的讲课学时大幅度削减,由原来的 72 至 64 学时压缩到现在的 48 学时(理论课学时),因此,原来的教材就显得篇幅比较庞大,让学生产生畏难情绪。为了适应本科各专业的需要,同时兼顾少学时,我们按照总授课时间不超过 60 学时的教学大纲,编写了这本教材。

我们编写本书的原则是:“少学时,重概念,偏集成,兼分立,终应用”。目的是在少学时的情况下,保证学生把基本知识和概念掌握扎实,同时努力培养学生处理实际问题和自学的能力,加强工程背景,强调实际操作,以适应培养应用型人才的需要。本书的第 1、2 章为入门基础内容,编写时压缩了分立元件的设计及其他次要内容,重点突出基本概念、基本原理、基本模型和基本分析方法;第 3 章为集成运放的组成,重点介绍电路结构、工作原理、性能特点及应用原理,为电路设计时选择和使用合适的集成电路芯片奠定基础;第 5~7 章为本课程的重点内容,主要讲解集成运放的线性及非线性的应用。全书“重外部,轻内部”,“先单级,后多级”,“先分立,后集成”,让学生从分立元件的外部特性入手,进而分析由分立元件构成的单级放大电路,然后由多级放大电路过渡到集成运放,并落脚于集成运放的应用,最终实现设计和调试由集成运放组成的各种应用电路。

考虑到电子电路设计自动化是目前电子技术发展的重要趋势,在本书每章的最后一节,给出了对本章典型电路的 Multisim 仿真,所有仿真实例都经编者上机仿真通过。仿真不仅突出了教学的重点内容和基本要求,学生还可以自己进行仿真实验。

本书第 2、3、5 章由魏英编写,绪言及第 1 章由杨鸿波编写,第 4、6 章由姜钧编写,第 7、8 章由杨飞编写,第 9 章由王丽霞编写,每章最后一节的仿真部分由李春云编写。全部编写工作是在魏英的具体组织下进行的。

在编写过程中,北京信息科技大学高晶敏教授给予了很大的帮助和指导,提出了许多宝贵意见。本书的编写工作得到了北京信息科技大学教材建设项目的支持,同时北京信息科技大学信息与控制实验教学中心的许多同志给予了热情的支持,在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 PN 结	4
1.2 半导体二极管及其基本电路	8
1.2.1 半导体二极管的电路模型	8
1.2.2 半导体二极管电路分析	10
1.2.3 半导体二极管的主要参数	12
1.2.4 二极管应用电路举例	13
1.2.5 稳压二极管	14
1.2.6 其他类型二极管	16
1.3 双极型晶体管	17
1.3.1 双极型晶体管的结构及类型	17
1.3.2 双极型晶体管的工作原理	18
1.3.3 晶体管的伏安特性	20
1.3.4 温度对晶体管特性的影响	21
1.3.5 晶体管的主要参数	22
1.3.6 直流偏置下晶体管的工作状态分析	23
1.4 场效应晶体管	26
1.4.1 结型场效应管	27
1.4.2 绝缘栅场效应管	30
1.4.3 场效应管的参数	33
1.4.4 直流偏置下场效应管工作状态分析	35
1.5 利用 Multisim 软件分析半导体器件的伏安特性曲线	36
1.5.1 利用 Multisim 观察二极管的单向导电特性	36
1.5.2 利用 Multisim 观察稳压管的稳压特性	37
1.5.3 利用 Multisim 观察双极型三极管的电流放大作用	38
本章小结	40
习题	40

第 2 章 基本放大电路	46
2.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标	46
2.1.1 放大的概念	46
2.1.2 放大电路的主要性能指标	46
2.2 晶体管放大电路的放大原理	50
2.2.1 共射放大电路的组成	50
2.2.2 晶体管放大电路的工作原理	52
2.2.3 直流通路和交流通路	53
2.3 放大电路图解分析法	54
2.3.1 直流图解分析	55
2.3.2 交流图解分析	56
2.3.3 静态工作点与放大电路的非线性失真	58
2.4 放大电路的交流等效电路分析法	59
2.4.1 晶体管的交流小信号模型	60
2.4.2 等效电路法分析共射放大电路	61
2.5 共集放大电路和共基放大电路	66
2.5.1 共集电极放大电路	66
2.5.2 共基极放大电路	69
2.5.3 三种基本组态的比较	71
2.6 场效应管放大电路	72
2.6.1 场效应管直流分析	72
2.6.2 场效应管的交流小信号模型	73
2.6.3 场效应管的三种组态放大电路分析	74
2.7 多级放大电路	76
2.7.1 级间耦合方式	77
2.7.2 多级放大电路的性能指标计算	79
2.8 单管共射放大电路 Multisim 仿真	80
本章小结	84
习题	84
第 3 章 集成运算放大电路	93
3.1 集成运算放大电路的特点	93
3.2 集成运算放大电路的组成	94
3.2.1 偏置电路	95
3.2.2 差分放大输入级	97
3.2.3 中间级	103
3.2.4 输出级	104
3.3 典型的集成运放电路	106

3.3.1 双极型集成运算放大电路 F007	106
3.3.2 CMOS 集成运算放大电路 C14573	108
3.4 集成运放的主要性能指标	108
3.5 集成运放使用中的几个具体问题	110
3.6 Multisim 仿真例题	111
本章小结	117
习题	117
第 4 章 放大电路的频率响应	122
4.1 放大电路的频率响应概述	122
4.1.1 高通电路	122
4.1.2 低通电路	123
4.1.3 波特图	124
4.2 晶体管的高频信号模型和高频参数	124
4.2.1 晶体管的高频信号模型	124
4.2.2 晶体管的高频参数	125
4.3 晶体管放大电路的频率响应	126
4.3.1 RC 耦合单管共射放大电路的频率响应	126
4.3.2 多级放大器的频率响应	129
4.4 场效应管放大电路的频率响应	132
4.4.1 场效应管的高频信号等效电路	132
4.4.2 共源放大电路的频率响应	132
4.5 Multisim 仿真例题	133
本章小结	136
习题	137
第 5 章 反馈放大电路	140
5.1 反馈的基本概念及类型	140
5.1.1 反馈的概念	140
5.1.2 反馈放大电路的判断	141
5.1.3 负反馈放大电路的框图及一般表达式	144
5.1.4 负反馈放大电路的组态和 4 种基本类型	146
5.2 负反馈对放大电路性能的影响	150
5.2.1 提高放大倍数的稳定性	150
5.2.2 扩展通频带	151
5.2.3 减小非线性失真	152
5.2.4 改变输入电阻和输出电阻	153
5.2.5 引入负反馈的一般原则	154
5.3 深度负反馈放大电路的近似计算	155

5.3.1	深度负反馈放大电路的特点	155
5.3.2	深度负反馈放大电路的近似计算	156
5.4	负反馈放大电路的稳定性	159
5.4.1	负反馈放大电路的自激振荡	159
5.4.2	负反馈放大电路的稳定工作条件	160
5.4.3	负反馈放大电路自激现象的消除	160
5.5	Multisim 仿真例题	160
	本章小结	163
	习题	164
第 6 章	信号的处理与运算电路	168
6.1	理想运放的概念	168
6.1.1	集成运放的模型与电压传输特性	168
6.1.2	理想运放工作在线性区的特点	168
6.1.3	理想运放工作在非线性区的特点	169
6.2	基本运算电路	170
6.2.1	比例运算电路	170
6.2.2	求和运算电路	173
6.2.3	求差与加减运算电路	175
6.2.4	积分和微分运算电路	178
6.2.5	对数和指数运算电路	181
6.2.6	乘法和除法运算电路	183
6.3	有源滤波器	186
6.3.1	滤波电路的作用与分类	186
6.3.2	低通滤波器	187
6.3.3	高通滤波器	189
6.3.4	带通滤波器	191
6.3.5	带阻滤波器	192
6.4	电压比较器	194
6.4.1	概述	194
6.4.2	单限比较器	195
6.4.3	滞回比较器	196
6.4.4	窗口比较器	199
6.5	Multisim 仿真例题	199
	本章小结	201
	习题	202
第 7 章	波形发生电路	207
7.1	正弦波振荡电路的分析方法	207

7.1.1	正弦波电路的振荡条件	207
7.1.2	正弦波振荡电路的组成	208
7.1.3	正弦波振荡电路的分析步骤	209
7.2	RC 正弦波振荡电路	209
7.2.1	RC 串并联网络的选频特性	210
7.2.2	RC 串并联网络振荡电路	210
7.3	LC 正弦波振荡电路	214
7.3.1	LC 并联电路的选频特性	214
7.3.2	变压器反馈式 LC 振荡电路	215
7.3.3	三点式 LC 振荡电路	216
7.3.4	石英晶体正弦波振荡电路	219
7.4	非正弦波发生电路	221
7.4.1	矩形波发生电路	221
7.4.2	三角波发生电路	224
7.4.3	锯齿波发生电路	226
7.5	Multisim 仿真例题	228
7.5.1	RC 桥式正弦波振荡电路的调试	228
7.5.2	三角波和方波发生器电路调试	232
	本章小结	235
	习题	235
第 8 章	功率放大电路	242
8.1	功率放大电路的特点与分类	242
8.1.1	功率放大电路的特点	242
8.1.2	功率放大电路的分类	244
8.2	乙类互补对称功率放大电路	245
8.2.1	双电源互补对称乙类功率放大电路	245
8.2.2	单电源互补对称乙类功率放大电路	249
8.3	甲乙类互补对称功率放大电路	250
8.3.1	双电源互补对称甲乙类功率放大电路	250
8.3.2	单电源互补对称甲乙类功率放大电路	251
8.4	集成功率放大电路	252
8.5	Multisim 仿真例题	253
	本章小结	256
	习题	256
第 9 章	直流稳压电源	260
9.1	直流电源的组成	260
9.1.1	电源变压器	260

9.1.2	整流电路	260
9.1.3	滤波电路	260
9.1.4	稳压电路	261
9.2	整流电路	261
9.2.1	单相半波整流电路	261
9.2.2	单相全波整流电路	263
9.2.3	单相桥式整流电路	265
9.2.4	倍压整流电路	267
9.3	滤波电路	268
9.3.1	电容滤波电路	269
9.3.2	电感滤波电路	272
9.3.3	复合型滤波电路	273
9.4	稳压电路	273
9.4.1	稳压电路的主要指标	274
9.4.2	线性串联型直流稳压电路	275
9.4.3	开关型直流稳压电路	280
9.5	Multisim 仿真例题	283
9.5.1	桥式整流电容滤波电路仿真	283
9.5.2	三端稳压器 W7805 稳压性能研究	286
	本章小结	287
	习题	288
	参考文献	294

第 1 章 半导体器件

电子信息产业已成为当今全球规模最大、发展最迅猛的产业,电子技术是其中的核心技术之一。现代电子信息技术,尤其是计算机和通信技术发展的驱动力,来自于半导体元器件的技术突破,每一代更高性能的集成电路的问世,都会驱动各个信息技术向前跃进,其战略地位十分重要。

贝尔实验室的科学家约翰·拜因等人在 1947 年 11 月底发明了晶体管,并在 12 月 16 日正式宣布“晶体管”的诞生。1956 年因此获诺贝尔物理学奖,自此在大多数领域中已逐渐用晶体管来取代电子管。1958 年,在德州仪器公司的实验室里,实现了把电子器件集成在一块半导体材料上的构想。集成电路的出现和应用,标志着电子技术发展到了一个新的阶段。它实现了材料、元件、电路三者之间的统一;同传统的电子元件的设计与生产方式、电路的结构形式有着本质的不同。随着集成电路制造工艺的进步,集成度越来越高,出现了大规模和超大规模集成电路,进一步显示出集成电路的优越性。

1.1 半导体基础知识

自然界的各种物质就其导电性能来说,可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体具有良好的导电特性,常温下,其内部存在着大量的自由电子,它们在外电场的作用下做定向运动形成较大的电流。因此导体的电阻率很小,只有 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。金属一般为导体,如金、银、铜、铝、铁等。绝缘体几乎不导电,如橡胶、陶瓷、塑料等,在这类材料中,几乎没有自由载流子,即使受外电场作用也不会形成电流,所以,绝缘体的电阻率很大,在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。

电阻率介于金属和绝缘体之间并有负的电阻温度系数的物质称为半导体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,如硅(Si)、锗(Ge)等,它们在室温条件下的电阻率约为 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。半导体材料很多,按化学成分可分为元素半导体和化合物半导体两大类。锗和硅是最常用的元素半导体;化合物半导体包括 III-V 族化合物(砷化镓、磷化镓等)、II-VI 族化合物(硫化镉、硫化锌等)、氧化物(锰、铬、铁、铜的氧化物),以及由 III-V 族化合物和 II-VI 族化合物组成的固溶体(镓铝砷、镓砷磷等)。除上述晶态半导体外,还有非晶态的玻璃半导体、有机半导体等。半导体之所以得到广泛应用,主要是因为它的导电能力受掺杂、温度和光照的影响十分显著。半导体具有这种性能的根本原因在于半导体原子结构的特殊性。

半导体具有以下三个重要的特性。

1. 热敏特性

半导体的电阻率随温度变化会发生明显的改变。利用半导体的热敏特性,可以制作感

温元件——热敏电阻。

2. 光敏特性

半导体的电阻率对光的变化十分敏感。有光照时,电阻率很小;无光照时,电阻率很大。例如,常用的硫化镉光敏电阻。利用半导体的光敏特性,可以制作各种类型的光电器件,如光电二极管、光电三极管及硅电池等。

3. 掺杂特性

掺入极微量的杂质元素,就会使半导体的电阻率发生极大的变化。例如,在纯硅中掺入百万分之一的硼元素,就会使硅的导电能力提高五十多万倍。

1.1.1 本征半导体

在半导体晶体中,每个原子与邻近原子之间由共价键连接。在电子器件中,用得最多的半导体材料是硅和锗,它们的简化原子模型如图 1-1 所示。硅和锗都是四价元素,在其最外层原子轨道上具有 4 个价电子。由于原子呈中性,惯性核用带圆圈的+4 符号表示。

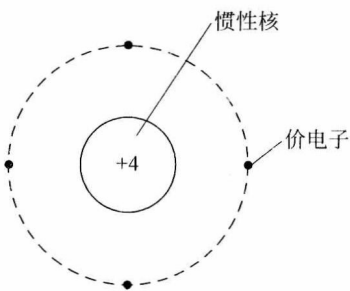


图 1-1 硅和锗的简化原子模型

半导体与金属和许多绝缘体一样,均具有晶体结构,它们的原子排列整齐,邻近原子之间由共价键连接,如图 1-2 所示。实际上半导体晶体结构是三维的。本征半导体(Intrinsic Semiconductor)是一种完全纯净的、结构完整的晶体。本征半导体在绝对零度($T=0K$)和没有外界激发时,它的每一个原子的最外层电子(价电子)被共价键所

束缚,而不能参与导电。

随着温度升高或者存在其他外界激发时(如光照),本征半导体共价键中的价电子在室温下获得足够的能量挣脱共价键的束缚,成为自由电子的现象称为本征激发(如图 1-3 所示)。本征激发产生电子-空穴(Hole)对。可以把空穴看成是一个带正电的粒子所带的电量,即电量与电子相等,符号相反。空穴在外加电场作用下,可以自由地在晶体中运动,从而

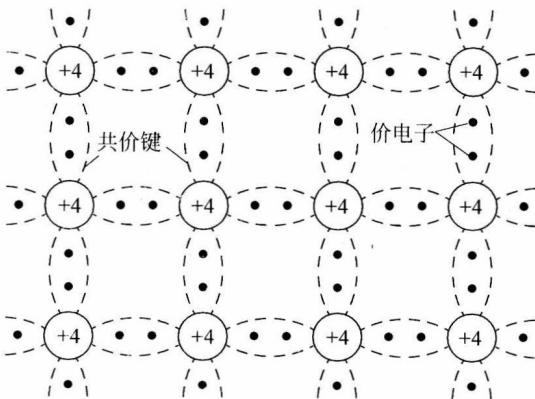


图 1-2 硅和锗的晶体结构

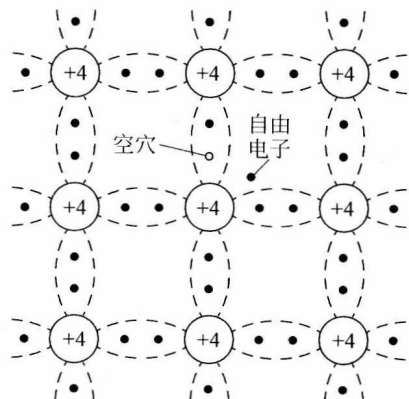


图 1-3 本征激发示意图

和自由电子一样可以参加导电。由于自由电子和空穴都参与导电,因此可以把两者统称为半导体中的“载流子”,所谓“载流子”就是可以运载电荷的粒子。在外加电场的作用下,载流子可以自由地在晶体中运动,从而和自由电子一样可以参加导电。不过空穴的运动,是人们根据共价键中出现空穴的移动而虚拟出来的,它实际上是因为共价键中束缚电子移动形成的。空穴浓度越大,半导体中的载流子数目就越多,因此形成的电流就越大。由于在本征半导体内自由电子和空穴是由本征激发产生的,所以自由电子和空穴总是成对出现的。也就是说,有一个自由电子就必定有一个空穴,因此在任何时候,本征半导体中的自由电子和空穴浓度总是相等的。当自由电子转移到某个空穴的时候,自由电子与空穴相碰同时消失的现象称为复合,因此可以认为空穴的移动方向和电子移动的方向是相反的。在一定的温度下,本征激发所产生的自由电子与空穴达到一定浓度的时候,新增的自由电子与空穴对数目,复合的自由电子与空穴对数目相等,达到动态平衡。

1.1.2 杂质半导体

当温度一定时,本征半导体中载流子的浓度是一定的,并且自由电子与空穴的浓度相等。当温度升高时,热运动加剧,挣脱共价键束缚的自由电子增多,空穴也随之增多(即载流子的浓度升高),导电性能增强;当温度降低时,载流子的浓度也降低,导电性能变差。因此本征半导体的导电性能与温度有关。半导体材料性能对温度的敏感性,是其可制作热敏和光敏器件的原因,但也是造成半导体器件温度稳定性差的原因。

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质,可使半导体的导电性能发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。制备杂质半导体时一般按百万分之一数量级的比例在本征半导体中掺杂。

本征半导体的导电能力很弱,热稳定性也很差,因此,不宜直接用它制造半导体器件。半导体器件多数是用含有一定数量的某种杂质的半导体制成。根据掺入杂质性质的不同,杂质半导体分为N型半导体和P型半导体两种。

1. N型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的五价元素,例如磷(P),则磷原子就会取代硅晶体中少量的硅原子,占据晶格上的某些位置。由图 1-4 可见,磷原子最外层有 5 个价电子,其中 4 个价电子分别与邻近 4 个硅原子形成共价键结构,多余的 1 个价电子在共价键之外,只受到磷原子对它微弱的束缚,因此在室温下,即可获得挣脱束缚所需要的能量而成为自由电子,游离于晶格之间。失去电子的磷原子则成为不能移动的正离子。磷原子由于可以释放 1 个电子而被称作施主(Donor)原子,又称施主杂质。在本征半导体中每掺入 1 个磷原子就可产生 1 个自由电子,而本征激发产生的空穴的浓度不变。这样,在掺入磷的半导体中,自由电子的浓度就远远超过了空穴数目,成

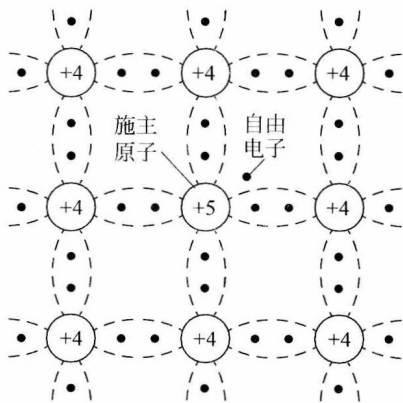


图 1-4 N 型半导体

为多数载流子(简称多子),空穴则为少数载流子(简称少子)。显然,参与导电的主要是电子,故这种半导体称为电子型半导体,简称 N 型半导体。掺入杂质越多,多子浓度越高,导电性越强,因此通过控制掺杂浓度就可以实现控制杂质半导体导电性的目的。

2. P 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中,若掺入微量的三价元素,如硼(B),这时硼原子就会取代晶体中的少量硅原子,占据晶格上的某些位置。由图 1-5 可知,硼原子的 3 个价电子分别与其

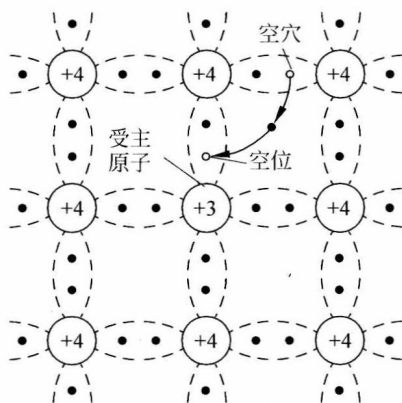


图 1-5 P 型半导体

邻近的 3 个硅原子中的 3 个价电子组成完整的共价键,而与其相邻的另一个硅原子的共价键中则缺少一个电子,出现了一个空穴。这个空穴被附近硅原子中的价电子填充后,使三价的硼原子获得了一个电子而变成负离子。同时,邻近共价键上出现一个空穴。由于硼原子起着接受电子的作用,故称为受主(Acceptor)原子,又称受主杂质。在本征半导体中每掺入一个硼原子就可以提供一个空穴,当掺入一定数量的硼原子时,就可以使半导体中空穴的浓度远大于本征激发电子的数目,成为多数载流子,而电子则成为少数载流子。显然,参与导电的主要是空穴,故这种半导体称为空穴型半导体,简称 P 型半导体。

1.1.3 PN 结

采用不同的掺杂工艺,通过扩散作用,将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块半导体(通常是硅或锗)基片上,在它们的交界面就会形成空间电荷区,称为 PN 结(PN Junction)。PN 结具有单向导电性。在一块半导体中,一部分掺有受主杂质是 P 型半导体,另一部分掺有施主杂质是 N 型半导体时,P 型半导体和 N 型半导体的交界面附近的过渡区就称为 PN 结。PN 结有同质结和异质结两种。用同一种半导体材料制成的 PN 结叫同质结,由禁带宽度不同的两种半导体材料制成的 PN 结叫异质结。制造 PN 结的方法有合金法、扩散法、离子注入法和外延生长法等。制造异质结通常采用外延生长法。

1. PN 结的形成

下面简单描述 PN 结的形成过程。在一块本征半导体的两侧通过扩散不同的杂质,分别形成 N 型半导体和 P 型半导体。此时将在 N 型半导体和 P 型半导体的结合面上形成如下物理过程:在 P 型半导体中有许多带正电荷的空穴和带负电荷的电离杂质。在电场的作用下,空穴是可以移动的,而电离杂质(离子)是固定不动的。N 型半导体中有许多可动的负电子和固定的正离子。当 P 型和 N 型半导体接触时,在界面附近空穴从 P 型半导体向 N 型半导体扩散(因为 P 区的空穴浓度大,物质因浓度差而产生的运动称为扩散运动,气体、液体、固体均有这种运动),电子从 N 型半导体向 P 型半导体扩散(因为 N 区的电子浓度大)。空穴和电子相遇而复合,载流子消失。因此在界面附近向两侧逐渐形成一段缺少载流

子、却有分布在空间的带电的固定离子的区域,称为空间电荷区(由于缺少多子,所以也称耗尽层或势垒层)。P型半导体一边的空间电荷是负离子,N型半导体一边的空间电荷是正离子。正负离子在界面附近产生的电场称为内建电场,该电场的方向由N指向P,因此阻止了载流子进一步扩散,促使少子漂移。其结果是多子扩散和少子的漂移达到平衡,最终载流子浓度在各处保持不变,空间电荷区宽度也不发生变化(空间电荷区的宽度直接决定了内建电场的强度)。PN结形成的过程可参阅图1-6。

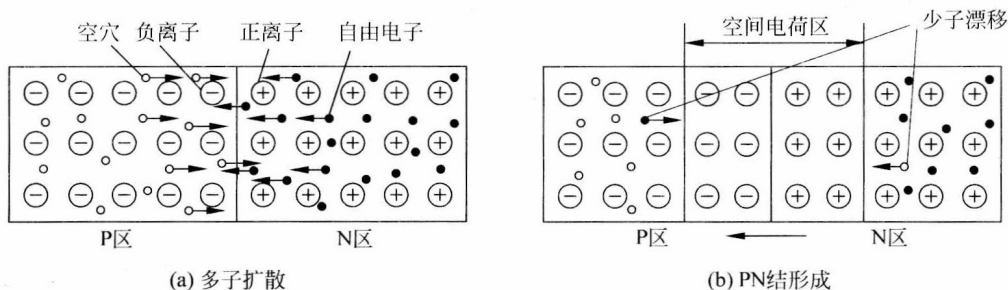


图 1-6 PN 结形成的过程

2. PN 结的单向导电性

PN 结的最主要的电特性为单向导电性。若外加电压使 PN 结 P 区的电位高于 N 区的电位则称为加正向电压,简称**正偏**;若 PN 结 P 区的电位低于 N 区的电位则称为加反向电压,简称**反偏**。所谓单向导电性即若外加正偏电压,PN 结呈低阻性;反之若外加反偏电压,PN 结呈高阻性。其原因是:

当 PN 结加正偏电压时,外加的正偏电压有一部分降落在 PN 结区,方向与 PN 结内电场方向相反,削弱了内电场(如图 1-7(a)所示),即**空间电荷区变窄**。于是,内电场对多子扩散运动的阻碍减弱,扩散电流加大。扩散电流远大于漂移电流,可忽略漂移电流的影响,PN 结呈现低阻性,称之为 PN 结导通。

当 PN 结加反偏电压时,外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区,方向与 PN 结内电场方向相同,加强了内电场(如图 1-7(b)所示),即**空间电荷区变宽**。内电场对多子扩散运动的阻碍增强,扩散电流大大减小。此时 PN 结区的少子在内电场作用下形成的漂移电流

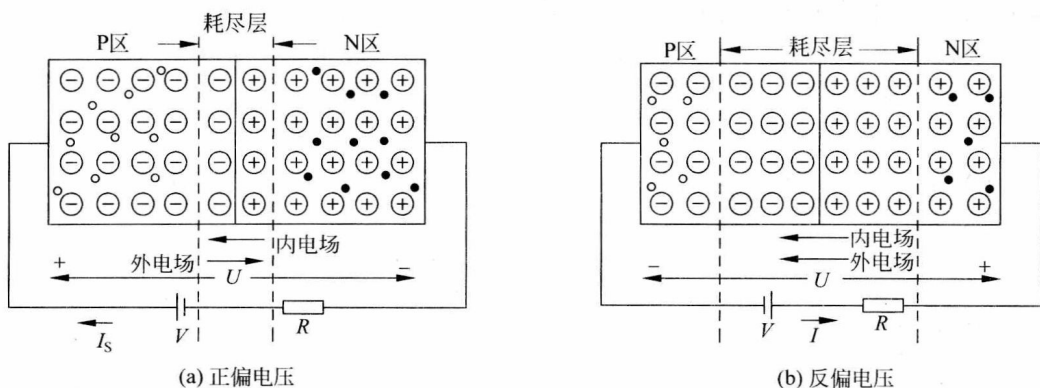


图 1-7 PN 结的单向导电性