



国家电工电子教学基地系列教材

现代电子线路 (上册)

Modern Electronic Circuits

◎王志刚 主编
◎龚杰星 副主编
◎谢嘉奎 主审



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北方交通大学出版社
<http://press.njtu.edu.cn>



国家电工电子教学基地系列教材

现代电子线路

上 册

王志刚 主 编
龚杰星 副主编
谢嘉奎 主 审

清华大学出版社
北方交通大学出版社
·北京·

内 容 简 介

全书共9章,分上、下两册。上册4章,包括:第1章半导体器件基础;第2章放大器基础;第3章集成运算放大器基础;第4章集成运算放大器应用。本教材大量精简了分立元件电路的分析设计篇幅,加强了专用新器件和应用技术的介绍。例如,在第3章中介绍了测量放大器、互导放大器、缓冲放大器、电压比较器和电源限(rail-to-rail)放大器原理;第4章在经典内容增加了许多运算放大器应用的实际知识。

本书上下两册适合总学时为120~200(两个学期)的本科教学用。本教材强调集成电路,强调应用原理和应用技术,增加了一些从事模拟电子系统设计的人门知识,也可供本科毕业生、研究生和从事实际电子系统设计的工程师参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子线路·上册/王志刚主编. —北京:北方交通大学出版社,2003.2
(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 7-81082-122-9

I. 现… II. 王… III. 电子电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核定(2003)第 009094 号

责任编辑:韩 乐

印刷者:北京东光印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686045 62237564

清华大学出版社 邮编:100084

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:23.75 字数:532千字

版 次:2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

印 数:5 000册 定价:30.00元

国家电工电子教学基地系列教材 编审委员会成员名单

主任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅 孙雨耕

委员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 陈后金 邹家驷 郑光信 屈波

侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞 廖桂生

薛质 戴瑜兴

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

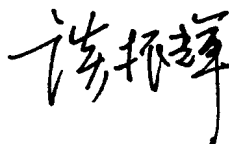
- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体;
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一;
- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力;
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信号处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路(上、下册)》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北方交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持,在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助,在此表示衷心的感谢。

北方交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, reading '高振军' (Gao Zhenjun), written in a cursive style.

2003年2月

序 言

两年前,我到郑州信息工程大学讨论有关这本教材修改问题时,顺便参观了王志刚教授领导的科研工作,对他们不畏艰难,精诚合作,勇于科研实践,取得丰硕成果深受教育,更为他们以奉献教育事业的高度责任感将长期科研实践中积累的经验教训融合到教学中,编写出一本体现高度应用性和科学性的“现代电子线路”教材的设想和实践表示由衷的敬佩,我当即表示,愿为提高这本教材的质量尽微薄之力。

这本教材不受传统教材的束缚,提出了一套全新的编写思路和内容处理方法,给人一种新鲜感。就其编写思路而言,整本教材在分立元件电路基础上十分强调集成电路;在集成电路方面,不刻意追求内部电路原理,而十分强调集成电路的应用原理和应用技术;在内容取舍上,不拘泥于电路的分析,而强调电路设计思路和方法。同时增加 A/D 和 D/A 变换的内容,使模拟电子学更趋于完整。就其内容处理而言,又有许多独到之处,力求将分散的内容融合成一个整体(例如用 Ebers-Moll 模型统一处理晶体三极管各工作区的特性);不追求分析过程的严密性和系统性,而十分重视突出基本概念和基本结论;不过多地纠缠在细节问题上,而把着眼点放在学生必须掌握的基本内容上。

这是一次大胆而有益的尝试,不可避免地存在一些不足之处,但已走出了可喜的一步,我期望教材编者能锲而不舍,精益求精,使教材质量进一步提高,也期望同行们能重视这次尝试,汲取他们有益的做法,编写出有新意,便于教学的高质量教材。

谢嘉奎

2003年3月

前 言

目前,国内已经出版了多种有关电子线路的优秀教材,如谢嘉奎教授主编的《电子线路》,童诗白教授主编的《模拟电子技术基础》,康华光教授主编的《电子技术基础》等都已出了四个版本并多次重印。这些教材经过多年的锤炼,具有非常好的使用效果。那么,为什么我们还要编写一本《现代电子线路》呢?这要从我们教研室老师们的经历谈起。我们教研室从1982年开始,至今一直参与军用、民用各种电子设备的科研开发,有多种产品目前还在广泛使用,还有少量出口。许多老师从中、小规模集成电路到超大规模集成电路都使用过。从事科研开发的老师都有一些感触:在20年科研中没有一个人使用过分立器件放大器,只在极个别情况下使用过晶体管缓冲器(跟随器);在非理想的实际工程中必须了解和使用的一些知识,在大学所有课程中很难找到;在数字信号处理(DSP)广泛用于原来传统的模拟系统(如软件无线电)的情况下,需要对A/D、D/A有关模拟信号的各项性能指标有更深入的理解;对一些非传统的新功能器件,例如可以达到电源极限的低功耗、大动态范围放大器(rail-to-rail)的原理渴望了解;从事电子系统设计的工程师再也不需要精心设计单元功能电路了(因为需要的功能电路应有尽有),可是把性能优良的集成电路连接成系统时,常常不能满足设计要求。在教学工作中我们也很愿意使用简单明了、易于理解的方法解释电子器件和电路的各种问题,不但省力,而且教学效果也好,但也常产生一些困惑:用载流子从浓度高向浓度低的地方扩散的现象来解释PN结的形成固然容易理解,可是用扩散现象不能解释金属与N型半导体接触时,电子会从浓度低的N型半导体向浓度高的金属中“扩散”;PN结两边有势垒电压存在,为什么把二极管的两个电极引线相接不会出现电流?既然金属与半导体相接触就产生肖特基整流结,那么二极管的金属引线与半导体接触为什么不显示肖特基整流结而只出现欧姆特性呢?既然电压并联负反馈只改善互阻增益,那么为什么集成运放的电压并联负反馈的补偿电容却对电压增益产生频率补偿呢?这些思索和困惑使我们产生一个念头:编写一本“另类”教材。对这本教材要有以下要求。

- (1) 尽可能精简关于分立元器件放大电路原理的分析计算和综合设计。
- (2) 关于半导体器件原理,必须能经得起推敲,在教材范围内能“自圆其说”。
- (3) 尽可能多介绍一些新的、专用的集成电路。
- (4) 尽可能多介绍一些实际工程应用知识。

要满足以上要求,必然增加教材的内容和难度。放弃以上要求,显然教和学都容易,也不需要编写新教材。还可以有另一种选择:另开一门课,把难度高的内容放到这门课中讲解。如果换一种思维方法:把两门课的学时加到一起集中使用,不也同样可以使用内容多,难度较高一点的教材吗?因此,我们决心编写一本教材,它的目标不是替代现有的优秀教材,但至少可以作为它们的补充。老师授课时,可以指定主要教材和难度不同的参考书。这本教材试用

了3届,师生普遍反映难度高,信息量大,开始不易接受,到后来逐渐适应。除因编者经验不足之外,试用期间安排学时太少也是试用中反映难度高的原因之一(上、下册各安排60学时,扣去长假等,实际最多只有54~56学时)。根据这本教材的信息量,上、下册各安排80学时比较合适。电子线路是一门实践性强的课程,单靠课堂教学,即使教材内容丰富,教材中增加很多的电子系统实际工程内容,也不能取代实践教学。

全书共9章,分上、下两册。上册4章,包括:第1章半导体器件基础;第2章放大器基础;第3章集成运算放大器基础;第4章集成运算放大器应用。下册5章,包括:第5章电源电路;第6章通信电路;第7章传感器与信号调整电路;第8章数模和模数转换器;第9章电子系统中的工程问题。

按照对本教材的第(1)、第(2)两条要求,我们精简了过时的内容,适当加强了基础理论。这主要体现在以下几个方面。

(1)在解释半导体器件工作原理时,除使用通俗的解释方法外,还增加了能级和能带的概念(可选学);全部用Ebers-Moll模型描述双极型晶体管特性,从而使各种应用状态都可得到明晰的理论结果;大大精简了图解分析和偏置电路的分析计算。

(2)在讲述分立器件放大器基础时,重点放在半导体器件放大原理和分立器件放大器的局限性及其克服方法上,完全是为后面的集成电路打基础,而不拘泥于分立器件放大器的设计和分析。放大器频率响应部分重点给出分析方法、通频带受限制的原因;用增益带宽乘积大小衡量各种组态放大器的优劣和适用场合。负反馈放大器内容压缩成一节,明确指出负反馈放大器对放大器性能的任何改善均可以用降低增益灵敏度来解释,并证明了负反馈(无论是哪种负反馈)对四种源增益中的任何一种都降低相同的倍数。

(3)在集成运放中分析了限制带宽和摆率的原因,以及改进措施,特别强调了宽带、高速运放中满功率带宽和摆率这两个性能指标比小信号带宽更重要。

按照对本教材的第(3)、第(4)两条要求,我们增加了如下一些内容。

(1)在集成运算放大器一章中,讨论了测量放大器、互导放大器、缓冲放大器、电压比较器和电源限(rail-to-rail)放大器原理,重点是它们与通用放大器的性能要求和拓扑结构上的区别,以及不同的使用场合。如果不用Ebers-Moll模型就无法解释双极型电源限(rail-to-rail)放大器之所以输入和输出信号都可以达到电源电压的原理。介绍了电流模技术原理,并用线性跨导原理分析差动放大器输入级和乘法器,结果表明在这类特定场合用线性跨导原理比原来的方法更加简单而有效。

(2)集成运算放大器应用部分,除了讨论常见的应用外,专门讨论了在实际工程应用中正确使用集成运放的注意事项。

(3)在通信电路一章中介绍了直接数字合成(DDS)技术原理,以及DDS技术在现代通信和其他领域的广泛应用。

(4)增加了传感器信号处理电路一章。这也是出于向实际应用倾斜的考虑。因为模拟放大器电路最难处理的信号之一便是微弱的传感器信号。本章介绍了电桥放大器、电荷放大

器、耐高共模电压的诺顿放大器、隔离放大器、自稳零放大器、双线发送器,以及对传感器进行非线性校正的一些专用电路技术。

(5)增加了 A/D 和 D/A 转换原理一章。传统上这个内容安排在数字电路中,但实际上它是模拟与数字世界的桥梁,凡是应用 A/D/A 的场合都离不开模拟系统。对 A/D/A 的主要性能指标要求是由模拟系统的性能指标决定的,而数字电路只需注重它的操作控制。在这一章中还介绍了可以实现高分辨率(高于 24 位)的过采样 A/D 转换器($\Sigma-\Delta$ A/D)。

(6)增加了专门介绍电子系统设计中的工程实际问题的一章,主要内容有:系统设计的一般方法、低噪声设计、可靠性设计、电磁兼容设计和电子设计自动化(EDA)。

我们清醒地知道,要让本科生“掌握”以上所有内容是不可能的。但可至少让他们了解毕业之后从事模拟电子系统设计时,除了需要模拟电路的基本知识之外,还有更多需要了解的知识,有更多的方法可以使用,有更多可以利用的器件,有更多需要考虑解决的实际问题。显然,这些切合实际的期望是可以实现的。这对于扩大学生的知识面有好处,对于从事模拟电子系统硬件设计的毕业生,也有一定的参考价值。

最初的编写大纲曾经华南理工大学的丘水生教授、武汉大学的甘良才教授、国防科技大学的陈善思教授审阅;试用初稿由东南大学的谢嘉奎教授和华南理工大学的丘水生教授审阅。谢嘉奎教授还同编者逐章讨论修改意见。他们宝贵的意见和建议使我们顺利地编写了试用初稿和第 2 稿,现在奉献给作者的已是第 3 稿,由谢嘉奎教授主审。全体编者对他的宝贵意见和热情支持表示深深的感谢,对他的辛勤劳动和敬业精神表示崇高的敬意。

全书由王志刚任主编,龚杰星任副主编。王志刚编写第 1,2,3,7,9 章和第 8 章的 8.4 节;龚杰星编写第 5 章;候之鸾编写第 6 章;陆利忠编写第 4 章;赵晶编写第 8 章的 8.1~8.3 节。刘文珂、罗晓丹、海涛、程保玮在试用本教材过程中提出过许多中肯的修改意见和建议。编者对他们的支持表示衷心感谢,还要感谢许许多多关心和支持本教材的编写、为编写工作提供可贵帮助的老师 and 同学。

书中带 * * 号的内容为选学内容。

限于编者水平,本教材可能达不到我们预想的目的,错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2003 年 3 月

参考文献

- 1 谢嘉奎. 电子线路(线性部分). 第4版. 北京:高等教育出版社,2000
- 2 张凤言. 电子线路基础. 第2版. 北京:高等教育出版社,1995
- 3 Jose B. Cruz, Jr. 著, 方辉煜 祝楚恒译. 反馈系统. 北京:国防工业出版社,1976
- 4 康华光. 电子技术基础(模拟部分). 第4版. 北京:高等教育出版社,2000
- 5 Alvin B. Philips. Transistor Engineering and Introduction to Integrated Semiconductor Circuits. McGraw-Hill Book Company, New York
- 6 Alan B. Grebene. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design. John Wiley & Sons, Inc. 1984
- 7 James G. Gottling. Electronics: Models, Analysis, and Systems. Marcel Dekker, Inc. New York, 1982
- 8 Arthur B. Glaser. Integrated Circuit Engineering: Design, Fabrication, and Applications Addison-Wesley Publishing Company, 1977
- 9 James M. Feldman. The Physics and Circuit Properties of TRANSISTORS. John Wiley & Sons, Inc, 1972
- 10 Jan M. Rabaey Digital Integrated Circuits: a Designperspective Prentice-Hall Inc, 1996
- 11 Wai-Kai Chen. Active Network and Feedback Amplifier Theory McGraw-Hill Book Company, New York, 1980
- 12 Analog Devices . High Speed Design Techniques, 2000
- 13 李清泉等. 集成运算放大器原理与应用. 北京:科学出版社, 1980
- 14 王筱颖. 模拟电路导论. 北京:高等教育出版社, 1988
- 15 周良权. 模拟电子技术基础. 北京:高等教育出版社, 1993
- 16 李士雄等. 模拟集成电路—器件、电路、系统及应用. 北京:人民教育出版社, 1981
- 17 何立民. 单片机应用系统设计. 北京:北京航空航天大学出版社, 1990
- 18 中国科学技术信息研究所: 电子产品世界, 1997, 1998, 1999
- 19 电子工业部六所: 电子技术应用. 1997. 05
- 20 MAXIM: 产品资料全集, (CDROM), 1999年修订
- 21 Analog Devices. Designers' Reference Manual Winter, (CDROM), 1999
- 22 MAXIM. 热门集成电路使用手册, 北京:人民邮电出版社, 1997
- 23 马明建等. 数据采集与处理技术. 西安:西安交通大学出版社, 1998
- 24 美国国家半导体公司: 世界著名 IC 汇集, Linear Supplement Databook, 1988
- 25 美国 RCA 半导体公司: 世界著名 IC 汇集, Linear Integrated Circuits, 1988
- 26 SL3000 计算机测井系统技术手册(第二卷) 1998

目 录

第 1 章 半导体器件基础	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	4
1.1.3 半导体的导电机制	6
1.2 PN 结	8
1.2.1 平衡状态下的 PN 结	9
1.2.2 PN 结的伏安特性	13
1.2.3 扩散电容	14
1.2.4 反向击穿与稳压二极管	15
1.2.5 PN 结的其他应用	17
** 1.2.6 肖特基结和欧姆接触	21
** 1.2.7 PN 结伏安特性方程的推导	23
1.3 二极管应用基础	26
1.3.1 二极管伏安特性及其模型	26
1.3.2 二极管大信号应用举例	28
1.3.3 二极管小信号应用举例	31
1.4 双极型晶体管原理	32
1.4.1 双极型晶体管工作原理和 Ebers-Moll 模型	33
1.4.2 四个工作区及伏安特性曲线	35
1.4.3 对 Ebers-Moll 模型的修正	41
** 1.4.4 Ebers-Moll 模型(晶体管伏安特性的解析方程)推导	44
1.5 晶体管应用基础	48
1.5.1 开关应用	48
1.5.2 晶体管用于线性放大原理	49
1.5.3 晶体管静态工作点设置	52
1.5.4 小信号等效电路	54
1.6 场效应晶体管	62
1.6.1 场效应管的基本原理	62
1.6.2 增强型 N 沟道 MOSFET	63
1.6.3 其他三种 MOSFET	71
1.6.4 结型场效应晶体管	73
1.6.5 场效应晶体管的应用	75

** 1.6.6 功率 MOSFET、电可擦写只读存储器	84
习题	87
第 2 章 放大器基础	97
2.1 放大器基本概念及主要性能指标	97
2.1.1 放大器主要性能指标	97
2.1.2 放大器的四种类型	107
2.2 分立元件晶体管放大器	108
2.2.1 BJT 三种组态基本放大器	108
2.2.2 FET 三种组态基本放大器	116
2.2.3 晶体管基本放大器的缺点及改进措施	120
2.3 分立元件差分放大器	121
2.3.1 电路结构	121
2.3.2 理想情况下差分放大器特性	126
2.3.3 非理想情况下差分放大器特性	129
2.3.4 FET 差分放大器	135
2.4 放大器频率响应	136
2.4.1 频率响应及其表示方法	137
2.4.2 基本组态放大器频率响应	143
2.4.3 组合态放大器的频率响应	152
2.5 放大器中的反馈	154
2.5.1 反馈放大器基本概念	154
2.5.2 负反馈降低灵敏度	157
2.5.3 负反馈改善失真	159
2.5.4 四种负反馈	163
2.5.5 负反馈对放大器其他性能的影响	165
习题	173
第 3 章 集成运算放大器基础	182
3.1 双极型晶体管集成运放	182
3.1.1 集成运算放大器基本结构	182
3.1.2 电流镜和电平移动电路	183
3.1.3 典型集成运放 $\mu\text{A}-741$ 电路分析	188
** 3.1.4 集成电路中的晶体管知识	196
3.2 CMOS 和 BiFET 集成运放	198
3.2.1 MOS 电流镜	198
3.2.2 CMOS 差分增益级	200

3.2.3	恒压源	201
3.2.4	CMOS反相器	202
3.2.5	输出级	203
3.2.6	CMOS集成运放的实例	205
3.2.7	BiFET集成运放	206
3.3	运放的频率特性及大信号运用	207
3.3.1	放大器的稳定性及其指标	207
3.3.2	频率补偿	209
3.3.3	大信号运用	213
3.4	专用运放	218
3.4.1	测量放大器	218
3.4.2	互导放大器	223
3.4.3	缓冲放大器(电压跟随器)	225
3.4.4	电压比较器	228
3.4.5	电源限放大器	231
3.5	宽带高速放大器	235
3.5.1	电压反馈运放	236
3.5.2	输入级发射极串联电阻降低互导	237
3.5.3	场效应管输入级结构	237
3.5.4	折叠式级联结构输入级	238
3.5.5	甲乙类(AB类)推挽输入级高速放大器	239
3.5.6	电流反馈运放	241
** 3.6	电流模电路	246
3.6.1	引言	246
3.6.2	跨导线性原理	247
3.6.3	电流模电路实例分析	249
3.6.4	电流模电路举例	250
3.7	模拟集成电路常识	255
3.7.1	工艺线宽和特征尺寸	255
3.7.2	半导体材料及模拟集成电路工艺发展现状	256
3.7.3	环境温度、电源电压等对运放性能的影响	258
	习题	260
第4章	集成运算放大器应用	265
	引 言	265
4.1	通用集成运放的模型和特性参数	267
4.1.1	运算放大器的电路符号	267

4.1.2	主要特性参数	267
4.1.3	运算放大器的模型	272
4.2	信号运算电路	275
4.2.1	运算放大器的三种基本输入形式	275
4.2.2	基本运算电路	278
4.2.3	实际集成运算放大器的运算特性	287
4.3	特殊用途运算放大器	293
4.3.1	测量放大器	294
4.3.2	程控增益放大器	297
4.3.3	采样/保持器	300
4.4	集成运算放大器的应用	307
4.4.1	有源滤波器	307
4.4.2	精密二极管电路	319
4.4.3	电压-电流变换器	322
4.5	比较器	324
4.5.1	比较器的基本原理	324
4.5.2	单片集成电压比较器	331
4.5.3	比较器的应用	334
4.6	正确使用集成运算放大器	344
4.6.1	集成运放的型号选择	345
4.6.2	正确使用性能参数	346
4.6.3	为输入偏置电路提供直流通路	349
4.6.4	合理选择外部电路元件	350
4.6.5	供电电源的去耦问题	352
	习题	352
	参考文献	363

第 1 章 半导体器件基础

从 1904 年弗莱明发明真空二极管,1906 年德福雷斯特发明真空三极管至 1948 年,各类电子设备都是用真空电子管为核心的电子器件构成的。由于真空电器件体积大、可靠性低、功耗大,限制了电子技术的应用和发展,人们进一步寻求性能更好的电子电路。1948 年,肖克莱、巴丁和布拉顿发明了晶体管,此后在短短十几年里就很快取代了真空电子管在通信等电子技术领域中的大部分应用,从此电子技术进入晶体管时代。在晶体管出现的最初几年里,制造晶体管的半导体材料主要是锗。1954 年硅晶体管商品面世,它比锗晶体管具有更好的温度特性和其他性能。1958 年集成电路开始出现,硅晶体管又在不到十年的时间里,把大部分分立晶体管功能电路(如放大器、计数器等)集成到一块小小的半导体晶片上,从而进入集成电路时代。此后又不断寻找性能更好的半导体材料,逐渐发现了砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等Ⅲ-V 族元素的化合物半导体材料。20 世纪 90 年代中后期,使用性能更为优越的Ⅳ-Ⅳ 族化合物半导体材料碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN),制造半导体器件的主要技术难题被解决。在半导体科学与技术中,通常把硅(Si)、锗(Ge)等称为第一代半导体材料,把砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等称为第二代半导体材料,而把碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)称为第三代半导体材料。第三代半导体材料的禁带宽度比前两代宽得多(比硅宽 1~2 倍),所以也称为宽禁带半导体材料。由于第三代半导体材料适合在高温环境下工作,又称为高温半导体材料(中等掺杂的 SiC 器件在 1000℃ 下也能正常工作),非常适合制造耐高温、抗强辐射、抗强腐蚀、耐磨损等极端恶劣条件下工作的电子器件,特别是高频、大功率器件。目前,集成电路主要以硅晶体为基本材料,以至于人们把美国的半导体生产基地称为“硅谷”(目前“硅谷”的含义已扩展到以微电子技术为先导的科技园区)。本章将从半导体材料的基本性质出发,学习半导体器件的基本原理和特性。

1.1 半导体基础知识

半导体是电阻率介于导体和绝缘体之间的物质,金属的电阻率低于 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$,绝缘体的电阻率为 $10^{14} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$,半导体的电阻率在 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。用材料内部的自由电子密度来衡量,良导体内自由电子密度大于 10^{22} 个/ cm^3 ,绝缘体只有约 10 个/ cm^3 ,而半导体硅在 23℃ 时的自由电子密度为 1.5×10^{10} 个/ cm^3 。

1.1.1 本征半导体

不含杂质而且结构非常完整的单晶半导体称为本征半导体,纯净的硅和锗单晶体就是本

征半导体。本征半导体在温度极低的条件下几乎不能导电,而当外界温度升高或者受到光照时,本征半导体的电导率迅速升高。实际上很难实现理想的本征半导体,在工程上把杂质浓度很低的单晶半导体称为本征半导体。

1. 本征半导体硅和锗的共价键结构

原子物理告诉我们,原子核周围的电子只能在一定的轨道上运动,在最外层轨道上运动的电子叫价电子。元素的许多物理和化学性质都是由价电子决定的,例如导电性能等。原子序数不同的元素可以具有相同的价电子数,例如硅的原子序数是 14,锗的原子序数是 32,但它们的价电子都是 4 个,因此都是四价元素。由于两者价电子数相同,所以它们的导电性能非常相似,都是半导体。它们的原子结构分别如图 1.1.1(a)和图 1.1.1(b)所示。如果把内层电子和原子核共同看成一个惯性核,则硅和锗的惯性核都带 4 个正电子电量,周围是 4 个价电子,其惯性核模型完全相同,如图 1.1.1(c)所示。

原子在形成分子或原子团时因各原子间的电子配合关系不同而分成三种化学键:共价键、离子键和金属键。一般把两个原子结合时通过形成共有电子对而产生的化学键叫做共价键。硅和锗就是共价键结构,如图 1.1.2(a)所示。

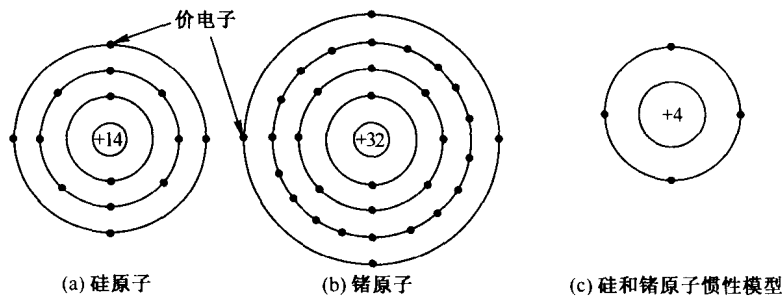


图 1.1.1 硅和锗原子结构模型

2. 本征半导体中的两种载流子及其热平衡浓度

在热力学温度 $T=0\text{ K}$ 下,且没有其他外界能量激发时,本征半导体的所有价电子都束缚在共价键中,没有可以自由移动的载流子,因此不导电。当温度升高时,例如在常温下($T=300\text{ K}$),部分价电子获得热能而挣脱共价键的束缚成为带负电的自由电子,同时在原共价键位置留下一个带正电荷空位,叫空穴,形成电子-空穴对,如图 1.1.2(b)所示。自由电子可以在电场作用下定向移动形成电流。空穴也可以在电场作用下被其他原子的价电子占据,这样空穴位置移动到提供价电子的原子位置上,这种空穴移动等效于带正电荷的粒子作定向运动,因而也可以形成电流。因此,本征半导体中的自由电子和空穴都可以参与导电,所不同的是电子带负电而空穴带正电,在电场作用下的运动方向相反。

共价键中的电子具有较低的能量,我们说它处于价带能级上。它挣脱共价键的束缚后变成自由电子就具有较高的能量,可以参与导电,因此说它处于导带能级上。任何电子都不可