



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电子信息类精品教材

模拟电子技术基础

Fundamentals of Analog Electronic Technology

(第3版)

• 王卫东 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
电子信息类精品教材

模拟电子技术基础

(第3版)

王卫东 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本教材是为了适应当前模拟电子技术基础课程的教学改革而编写的。教材内容包括:半导体基础及二极管应用电路、双极型晶体管和场效应管原理、晶体管放大器基础、模拟集成基本单元电路、放大器频率响应、负反馈技术、集成运算放大器及应用、直流稳压电源、电流模式电路基础及应用、电流传输器、跨导运算放大器(OTA)原理及应用等。

本书以“讲透基本原理,打好电路基础,面向集成电路”为宗旨,避免复杂的数学推导,强调物理概念和晶体管器件模型的描述,加强场效应管(尤其是 MOS 场效应管)的电路分析,充分重视集成电路的教学。在若干知识点的阐述上,本教材特色鲜明,并在内容取舍、编排以及文字表述等方面都力求解决初学者入门难的问题。另外为了帮助初学者更好地学习本书,对所述的基本电路利用 EWB 的电路设计软件进行了电路仿真,同时还配有 CAI 教学软件。

本书可作为高等院校工科学生电子技术基础课程教材,也适用于广大电路工作者参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/王卫东等编著. —3 版. —北京:电子工业出版社,2016.7

电子信息类精品教材

ISBN 978-7-121-28862-3

I. ① 模… II. ① 王… III. ① 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ① TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 109752 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾 李宪强 宋 薇

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:26.25 字数:756 千字

版 次:2003 年 8 月第 1 版

2016 年 7 月第 3 版

印 次:2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价:56.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:88254113。

前 言

本书是高等学校电气信息类专业“模拟电子技术”课程的入门教材,是广西高等学校“十一五”优秀教材立项项目,所对应的“模拟电子技术”课程为广西高校精品课程,并于2013年评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

随着半导体技术的发展,模拟电子技术课程所涵盖的内容越来越多,但受限于新的教学大纲和学生知识结构的变化,本课程的授课学时数却越来越少,该教材就是为了适应这种形势的需要而编写的。

本书依据国家教委制定的电子、通信等专业《电子电路(I)、(II)课程教学基本要求》,在认真分析研究了2000年以来出版或再版的若干国内外同类优秀教材的特长,在本书第1版(2003年由西安电子科技大学出版社出版)的基础上,结合多年教学体会,编写而成的,力求体现以下思路和特色。

1. 由于场效应管在模拟电子电路、逻辑电路,特别是在近代超大规模集成电路(VLSI)中已占据主流地位,因此本教材加强了场效应管(尤其是MOS场效应管)的教学内容。为了便于学生理解和掌握各类半导体器件及其构成的基本电路的工作原理,教材采用归类对比的教学方法,把双极型晶体管(BJT)和场效应晶体管(FET)作为一个整体,贯穿到全书各章节。例如,第2章根据各器件的工作原理、载流子的传输过程、伏安特性、主要参数和低频微变等效电路模型等,把双极型晶体管(BJT)、结型场效应管(JFET)和绝缘栅型金属-氧化物-半导体场效应管(MOS)归类后,整体介绍给读者。第3章从晶体三极管放大电路的工作原理、晶体管的偏置方式、图解法和微变等效电路法入手,根据晶体管放大电路的基本指标(电压放大倍数、电流放大倍数、输入阻抗和输出阻抗等),把BJT和FET的各种组态电路归类成:共射极和共源极电路作为反相电压放大器,共集电极和共漏极电路相当于电压跟随器,共基极和共栅极放大器相当于电流跟随器。

2. 随着科技的发展,与分立元件电路相比,集成电路的优点十分突出。用集成电路组成系统,省时、省力、省钱,性能好,可靠性高,所以必须充分重视集成电路的教学。但重点应放在与集成电路引出端有关的内部单元电路上,应该摒弃以分立元件电路为主干的旧教学模式,代之以集成电路芯片中常用的“基本单元电路”。教材在第4章重点介绍模拟集成电路(IC, Integrated Circuits)中广泛使用的几种基本单元电路:恒流源电路、有源负载放大器、差动放大电路和互补推挽功放输出级等。第7章对双极型通用集成运算放大器和CMOS集成运算放大器的内部电路做了典型分析。编者认为,学习模拟电路首先要打好基础,这样才能有效地提高学生“读电路”的能力,做到灵活应用集成电路,发挥好集成电路的作用。学习分立元件电路的目的正在于此。

3. 本课程的新概念多,知识点多,服务的对象是初学者。所涉及的基本理论、基础知识和基本方法对本科学的培养起着重要的作用;而且课程的内容体系与其他相关的专业课程之间保持着紧密的衔接和交融,因此在基本概念的讲述上不能压缩篇幅,这是使教材易读的重要措施。另外,过多的数学分析推导既占用了大量的教学学时,还可能分散学生的注意力,甚至掩

盖物理概念。在这方面,本教材借鉴国外教材的写法:文字阐述详尽,公式简明易记,鲜有数学推导,不仅易教更要易读、易学。总之,教材力求做到增加可读性,减少学生阅读和学习的困难。

4. 教材在加强基本概念的基础上最大限度地删减了对半导体器件(晶体二极管、双极型晶体管 and 场效应晶体管)内部物理过程的数学分析,把注意力放在器件的模型、参数和伏安特性上面。由于新品种、新电路不断涌现,但基本概念、基本原理不会变化。教材始终以“讲透概念原理,打好电路基础”为宗旨,在章节次序的安排上尽量符合由浅入深,由个别到一般的认识规律。以“边器件边电路”的方法,讲完一种器件,接着就讲它的基本应用电路。放大电路的分析也按照先基础电路后实用变形电路来编排。

5. 模拟电路是学生接触到的第一门工程型、技术型、实用型而非理论型的课程,它与先修课程“电路分析基础”和“信号与系统”有很大的差别。后者是讲述模型化电路和信号的分析方法,而电路的结构、元件的取值和信号的性质的不同并不影响分析方法的学习。但模拟电子电路却是具有一定功能的实用电路,学生在学习电子电路课程时,由于受习惯思维的影响,碰到的第一个疑点和难点是不理解电子电路课程的工程性特点。因此,教材中注意强调电路结构和元件取值的合理性。电路的计算则用工程近似方法:抓住主要矛盾来进行工程估算,使之既不失设计计算的正确性和可靠性,又能使分析和设计计算简单化。

6. 教材注意加强与两门先修课程的联系。实际上,从分析电子电路的观点而言,电路中的电子器件或单元电路模型化以后,剩下的工作就是依靠这两门先修课程的知识来完成的。因此,教材有意识地加强了电路模型的概念,例如:放大器通用模型等。第5章放大器频率特性分析也从系统极点与开路和短路时间常数关系出发来研究。总之,先修课程应作为模拟电路课的有力工具,使学生掌握研究电路的统一方法,使所学的知识得到从具体到抽象的升华。

7. 随着半导体技术的发展,模拟集成电路领域里的新器件、新技术不断涌现。面对21世纪新的人才培养的要求,基础课程的教学应该与科技发展同步。教材除了在第7章对通用模拟集成电路最重要的品种——集成运算放大器重点分析外,在第9章对模拟集成电路的新技术——电流模技术也做适当的介绍,以增加学生学习兴趣,开拓视野和思路,适应现代科技对人才的要求。

本书由王卫东编著,周茜参加了各章节习题和思考题的编写,参加本书编写工作的还有王臻、郑凌霄、苏维娜、袁鸣,全书由王卫东统编定稿。在本书编写过程中,本书作者从所列参考文献中吸取了宝贵的成果和资料,在此谨向各参考文献的著译者表示衷心的感谢。感谢电子工业出版社韩同平编辑对本书出版给予的支持和帮助。作者深知,模拟电子技术范围广,新知识多,我们对这一领域的学习和研究水平十分有限,书中一定有不少错误和不妥之处,希望读者给以批评指正。

本书配有电子课件,可以登录华信教育资源网,注册后,免费下载。

本书可与作者编著的《高频电子电路(第3版)》(书号978-7-121-19187)配套,使得这2门“电子线路”姊妹课程内容设计精炼、完整,衔接紧凑,便于教师合理、有效地组织教学和学生系统学习与掌握课程精华。

编著者

于桂林电子科技大学

(Wangwd@gliet.edu.cn)

常用符号表

1. 几点约定

(1) 电压、电流(以集电极电流和电压为例)

I_C, U_C	大写字母、大写下标,表示集电极直流电流和电压
I_c, U_c	大写字母、小写下标,表示集电极电流和电压交流分量有效值
i_C, u_C	小写字母、大写下标,表示集电极含直流的电流和电压总瞬时值
i_c, u_c	小写字母、小写下标,表示集电极电流和电压的交流分量
I_{cm}, U_{cm}	大写字母、小写下标,表示集电极电流和电压交流分量最大值
$\Delta I_C, \Delta U_C$	表示直流电流和电压的变化量
$\Delta i_C, \Delta u_C$	表示总瞬时值电流和电压的变化量

(2) 电阻

R	表示电阻器的电阻或电路的等效电阻
r	表示器件内部的等效动态电阻

2. 电路参数符号

(1) 电压、电流

i_i, u_i	交流输入电流,交流输入电压
i_o, u_o	交流输出电流,交流输出电压
I_Q, U_Q	静态电流,静态电压
u_{ic}	共模输入电压
u_{id}	差模输入电压
U_R	基准电压、参考电压
U_T	温度电压当量
U_{TH}	阈值电压
E_C, E_E	电源电压

(2) 频率、时间

$BW(\Delta f_{0.7} \text{ 或 } \Delta \omega_{0.7})$	通频带(即 -3 dB 带宽)
f_H, ω_H	上限截止频率、角频率
f_L, ω_L	下限截止频率、角频率
t_τ	上升时间
T	周期(或温度)
τ	时间常数

(3) 电阻

R_i	输入电阻
-------	------

R_{if}	闭环输入电阻
R_L	负载电阻
R_o	输出电阻
R_{of}	闭环输出电阻
R_s	信号源内阻或场效应管电路的源极电阻

(4) 功率

P_T	集电极功耗
P_O	输出功率
P_E	电源消耗功率

(5) 放大倍数(增益)

$A_i(A_{if})$	开环(闭环)电流放大倍数
$A_r(A_{rf})$	开环(闭环)跨阻放大倍数
$A_g(A_{gf})$	开环(闭环)跨导放大倍数
$A_u(A_{uf})$	开环(闭环)电压放大倍数
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{um}	中频电压放大倍数
A_{ul}	低频电压放大倍数
A_{uh}	高频电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的源电压放大倍数
F	反馈系数
F_i	电流反馈系数
F_r	跨阻反馈系数
F_g	跨导反馈系数
F_u	电压反馈系数

(6) 其他

K_{CMR}	共模抑制比
D	非线性失真系数
η	效率
φ	相位角

3. 器件参数符号

(1) 半导体二极管

r_d	二极管动态电阻
r_z	稳压管动态电阻
C_T	势垒电容
C_D	扩散电容
C_J	结电容
I_F	额定整流电流

I_R	反向电流
I_S	反向饱和电流
I_{Zmax}	稳压管最大稳定电流
$U_{(BR)}$	反向击穿电压
U_ϕ	内建电位差
U_{ON}	正向开启(死区或门限)电压
U_Z	稳压管的稳定电压

(2) 半导体三极管

f_α	共基极截止频率
f_β	共射极截止频率
f_T	特征频率
g_m	跨导(即互导)
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
r_{be}	共射结输入电阻
I_{CBO}	发射极开路时集电极、基极间反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路时集电极、发射极间穿透电流
I_{CM}	集电极最大电流
P_{CM}	集电极最大允许功耗
BU_{CBO}	发射极开路时集电极、基极间反向击穿电压
BU_{CEO}	基极开路时集电极、发射极间反向击穿电压
BU_{EBO}	集电极开路时发射极、基极间反向击穿电压
U_{CES}	集电极饱和电压降
$\alpha(\bar{\alpha})$	共基极交流(直流)电流放大系数
$\beta(\bar{\beta})$	共射极交流(直流)电流放大系数

(3) 场效应晶体管

r_{ds}	漏源间等效电阻
C_{ds}, C_{gd}, C_{gs}	漏源、栅漏、栅源间极间电容
I_{DSS}	饱和漏极电流
P_{DM}	漏极最大耗散功率
BU_{DS}	漏源击穿电压
$U_{GS(off)}$	夹断电压
$U_{GS(th)}$	开启电压

目 录

第 1 章 半导体基础及二极管应用	
电路	(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 漂移电流与扩散电流	(6)
1.2 PN 结	(8)
1.2.1 PN 结的形成及特点	(8)
1.2.2 PN 结的单向导电特性	(10)
1.3 晶体二极管及其应用	(11)
1.3.1 晶体二极管的伏安特性	(11)
1.3.2 二极管的直流电阻和交流电阻	(13)
1.3.3 二极管模型	(15)
1.3.4 二极管应用电路举例	(17)
1.3.5 稳压管及其应用	(19)
1.3.6 PN 结电容效应及应用	(21)
1.3.7* 特殊二极管	(23)
本章小结	(26)
思考题与习题 1	(26)
第 2 章 晶体三极管基础	(30)
2.1 双极型晶体三极管	(30)
2.1.1 BJT 的工作原理	(30)
2.1.2 BJT 的静态特性曲线	(37)
2.1.3 BJT 主要参数	(39)
2.1.4 BJT 小信号模型	(42)
2.2 结型场效应管	(49)
2.2.1 JFET 的结构和工作原理	(49)
2.2.2 JFET 的特性曲线及参数	(52)
2.2.3 JFET 的小信号模型	(56)
2.3 金属-氧化物-半导体场效应管	(56)
2.3.1 N 沟道增强型 MOSFET 工作	
原理	(57)
2.3.2 N 沟道耗尽型 MOSFET 工作	
原理	(61)
2.3.3 MOSFET 小信号模型	(64)
2.3.4 场效应晶体管与双极型晶体管的比较	(69)
本章小结	(71)
思考题与习题 2	(72)
第 3 章 晶体管放大电路基础	(77)
3.1 放大电路的基本组成和工作原理	(77)
3.1.1 基本放大器及其模型	(77)
3.1.2 放大电路的组成及其直流、交流通路	(80)
3.1.3 放大电路的图解法	(87)
3.2 三类基本组态放大电路的交流特性分析	(94)
3.2.1 共射和共源放大电路	(95)
3.2.2 共集和共漏放大电路	(102)
3.2.3 共基和共栅放大电路	(106)
3.2.4 三类基本组态放大电路的比较	(111)
3.3 多级放大电路	(115)
3.3.1 多级放大器耦合方式	(115)
3.3.2 多级放大器性能指标的计算	(117)
3.3.3 组合放大器	(118)
本章小结	(124)
思考题与习题 3	(125)
第 4 章 模拟集成基本单元电路	(135)
4.1 半导体集成电路概述	(135)
4.2 恒流源和稳定偏置电路	(136)
4.2.1 BIT 参数的温度特性	(136)

4.2.2 BJT 恒流源	(138)	5.3.3 开路时间常数分析法的 应用	(216)
4.2.3 MOS 恒流源	(144)	5.3.4 短路时间常数分析法及其 应用	(221)
4.3 带恒流源负载的放大电路 ...	(149)	5.4 多级放大器高、低截止频率的 估算方法	(223)
4.3.1 BJT 有源负载放大电路	(149)	5.4.1 多级放大器截止频率估算的 一般性方法	(223)
4.3.2 MOS 有源负载放大电路	(151)	5.4.2 两级差动放大器的频率特性 分析	(224)
4.4 差动放大器	(153)	本章小结	(225)
4.4.1 差放的偏置、输入和输出信号 及连接方式	(153)	思考题与习题 5	(226)
4.4.2 差动放大器的大信号差模传输 特性	(157)	第 6 章 负反馈技术	(229)
4.4.3 差动放大器的微变等效 分析	(159)	6.1 概述	(229)
4.4.4 有源负载差动放大器	(165)	6.2 反馈放大器的单环理想 模型	(230)
4.4.5 MOS 差动放大电路	(165)	6.2.1 单环放大器的理想模型	(230)
4.5 功率输出级电路	(171)	6.2.2 基本反馈方程	(231)
4.5.1 功率放大器的特点、指标和 分类	(171)	6.2.3 四种基本负反馈组态	(232)
4.5.2 互补推挽乙类功率放大器	(174)	6.3 负反馈对放大器性能的 影响	(237)
4.5.3 其他乙类推挽功率放大器	(180)	6.3.1 提高闭环增益的稳定性	(237)
4.5.4 MOS 输出级电路	(181)	6.3.2 扩展闭环增益的通频带	(238)
4.5.5 达林顿组态	(183)	6.3.3 减小非线性失真	(239)
4.6 BiCMOS 电路	(187)	6.3.4 改变放大器的输入电阻	(240)
本章小结	(189)	6.3.5 改变放大器的输出电阻	(241)
思考题与习题 4	(190)	6.3.6 引入负反馈的一般原则	(243)
第 5 章 放大电路的频率特性	(198)	6.4 负反馈放大电路的分析与 计算	(246)
5.1 放大电路频率特性的基本 概念	(198)	6.4.1 深度负反馈放大电路的参数 估算	(246)
5.1.1 频率特性和通频带	(198)	6.4.2 利用方框图法进行分析 计算	(246)
5.1.2 频率失真和增益带宽积	(200)	6.4.3 方框图法分析计算举例	(249)
5.2 放大电路的复频域分析法	(200)	6.4.4 反馈放大器 AF 网络分析法 小结	(253)
5.2.1 复频域中放大电路的增益 函数	(200)	6.5 负反馈放大器的频率响应	(254)
5.2.2 放大电路增益函数的特点	(203)	6.5.1 负反馈对放大器频率特性的 影响	(254)
5.2.3 放大电路波特图的近似 画法	(206)		
5.3 基本放大器高、低截止频率的 估算	(213)		
5.3.1 主极点的概念	(213)		
5.3.2 开路时间常数分析法	(214)		

6.5.2 负反馈放大器的稳定性	(257)	本章小结	(327)
6.5.3 相位补偿原理与技术	(261)	思考题与习题 7	(327)
本章小结	(265)	第 8 章 直流稳压电源	(335)
思考与习题 6	(266)	8.1 直流稳压电源的组成	(335)
第 7 章 集成运算放大器及其 应用	(272)	8.2 整流电路	(335)
7.1 通用集成运算放大器的基本 特点	(272)	8.3 滤波电路	(339)
7.1.1 集成电路及其特点	(272)	8.3.1 电容滤波电路	(339)
7.1.2 集成运算放大器的组成	(274)	8.3.2 电感滤波电路	(341)
7.2 双极型通用集成运算放大器	(275)	8.3.3 复式滤波电路	(342)
7.2.1 电路基本结构概述	(276)	8.4 倍压整流电路	(342)
7.2.2 直流偏置分析	(278)	8.5 线性稳压电路	(343)
7.2.3 交流小信号分析	(282)	8.5.1 稳压电路的质量指标	(344)
7.3 CMOS 集成运算放大器	(287)	8.5.2 串联型线性稳压电路	(344)
7.3.1 5G14573 CMOS 集成运算 放大器	(287)	8.5.3 集成线性稳压电路	(347)
7.3.2 三级 CMOS 运算放大器	(289)	8.6 开关型稳压电源	(351)
7.3.3 折叠式共源-共栅 CMOS 运算 放大器电路	(291)	本章小结	(353)
7.4 集成运算放大器的特性 参数	(293)	思考题与习题 8	(354)
7.5 理想运算放大器	(297)	第 9 章 电流模式电路基础	(357)
7.6 集成运算放大器的线性 应用	(301)	9.1 电流模式电路的一般概念	(357)
7.6.1 加法运算电路	(301)	9.2 跨导线性的基本概念	(359)
7.6.2 差动放大器	(303)	9.2.1 跨导线性环路	(359)
7.6.3 测量放大器	(303)	9.2.2 由 TL 构成的电流模电路	(362)
7.6.4 积分器	(305)	9.3 电流传输器	(368)
7.6.5 微分器	(306)	9.3.1 电流传输器端口特性	(369)
7.7 集成运算放大器的非线性 应用	(308)	9.3.2 电流传输器基本应用	(371)
7.7.1 对数和指数运算电路	(308)	9.4 跨导运算放大器	(375)
7.7.2 波形变换电路	(309)	9.4.1 概述	(375)
7.8 集成运算放大器的其他应用 简介	(313)	9.4.2 OTA 的基本概念	(375)
7.8.1 电压比较器	(313)	9.4.3 双极型集成 OTA	(376)
7.8.2 有源滤波器	(317)	9.4.4 OTA 电路的应用原理	(378)
7.8.3 波形发生器	(320)	9.4.5 OTA 跨导控制电路	(384)
		本章小结	(386)
		思考题与习题 9	(386)
		附录 A 我国半导体器件型号命名方法(根据 国家标准 GB 249—74)	(389)
		附录 B 国际电子联合会半导体器件 型号命名法	(389)
		附录 C 美国半导体器件型号 命名法	(390)

附录 D 日本半导体器件型号	参数	(394)
命名法	附录 G 国产半导体集成电路的命名	
附录 E 国产半导体二极管主要	方法	(397)
参数	部分习题参考答案	(399)
附录 F 常用半导体三极管的主要	参考文献	(407)

第 1 章 半导体基础及二极管应用电路

本章首先介绍半导体的基础知识,介绍 PN 结的单向导电原理、PN 结的击穿和电容效应,给出二极管的伏安特性、主要参数和等效电路,然后讨论以 PN 结为基本结构的二极管的工作原理、特性、主要参数、等效电路和应用电路。

1.1 半导体基础知识

如果从物体的导电性考虑,固体材料可分为三类。第一类具有良好的导电性,称为导体,如铜、铝、铁、银等。因为这类材料在室温条件下,有大量电子处于“自由”运动的状态,这些电子可以在外电场的作用下,定向运动,形成电流。导体的电阻率很小,只有 $10^{-6} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。第二类是不能够导电的材料,称为绝缘体,如橡胶、塑料等。在这类材料中,几乎没有“自由”电子,因此,即使有了外电场的作用,也不会形成电流。绝缘体的电阻率很大,一般在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。第三类是所谓的半导体,它们的电阻率介于导体与绝缘体之间,通常在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内,如硅、锗、砷化镓、锗化钢等。

半导体之所以受到人们的高度重视,并获得广泛的应用,不是因为它的电阻率介于导体和绝缘体之间,而是因为它具有不同于导体和绝缘体的独特性质。这些独特的性质集中体现在它的电阻率可以因某些外界因素的改变而明显地变化,具体表现在以下 3 个方面。

(1) 掺杂性:半导体的电阻率受掺入“杂质”的影响极大,在半导体中即使掺入的杂质十分微量,也能使其电阻率大大地下降,利用这种独特的性质可以制成各种各样的晶体管器件。

(2) 热敏性:一些半导体对温度的反应很灵敏,其电阻率随着温度的上升而明显地下降,利用这种特性很容易制成各种热敏元件,如热敏电阻、温度传感器等。

(3) 光敏性:有些半导体的电阻率随着光照的增强而明显下降,利用这种特性可以做成各种光敏元件,如光敏电阻和光电管等。

半导体为什么会具有上述特性呢?为了对半导体器件有较深的认识,正确地使用各种半导体器件,迅速掌握不断出现的各种新型器件,有必要熟悉一些半导体物理的基本知识,掌握半导体内部结构的电压电流关系及等效的物理模型,这些就是我们学习本章的目的和要求。

1.1.1 本征半导体

本征半导体 (intrinsic semiconductor) 是指纯净的、不含杂质的半导体。在近代电子学中,最常用的半导体是硅(Si)和锗(Ge),它们的原子结构示意图如图 1-1(a)和(b)所示。由图可知硅 Si(14)和锗 Ge(32)的外层电子数都是 4 个,由于外层电子受原子核的束缚力最小,称为价电子,有几个价电子就称为几价元素,因此硅和锗都是四价元素。

物质的许多物理现象(如导电性)与外层价电子数有很大的关系。为了方便地研究价电子的作用,常把原子核和内层电子看做一个整体,称为惯性核;由于整个原子呈中性,惯性核带 +4 单位正电荷,这样惯性核与外层价电子就构成一个简化的原子结构模型,如图 1-1(c)

所示。显然 Si 和 Ge 元素的简化原子模型是相同的,今后我们将以这样的简化原子结构模型来研究 Si 或 Ge 半导体内部的物理结构。

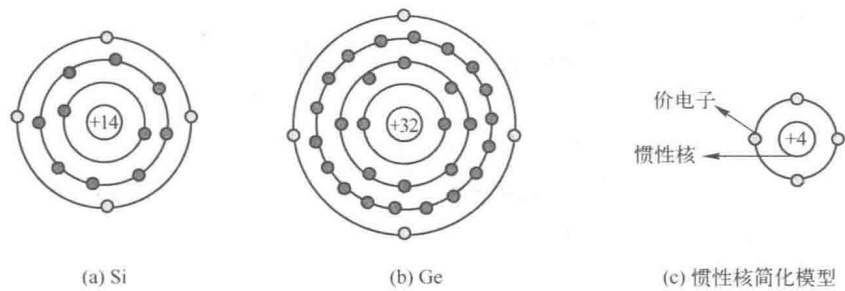


图 1-1 硅和锗原子结构模型

1. 共价键结构

根据原子的理论:原子外层电子数达到 8 个才能处于稳定状态。因此当 Si(或 Ge)原子组成单晶体后,每个原子都必须从四周相邻原子得到 4 个价电子才能组成稳定状态。实际上单晶体的最终结构是一个四面体,每一个 Si(或 Ge)原子周围都有四个邻近的同类原子,如图 1-2 所示。单晶体中的各原子之间有序、整齐地排列在一起,原子之间靠得很近,价电子不仅受本原子的作用,还要受相邻原子的作用。即每一个价电子都被相邻原子核所共有,每相邻两个原子都公用一对价电子,形成共价键结构。图 1-3 所示为单晶体的二维共价键结构示意图。

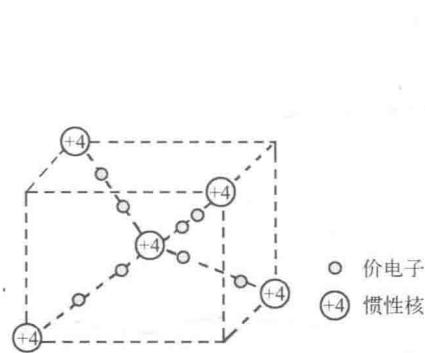


图 1-2 Si(或 Ge)单晶体(四面体)结构示意图

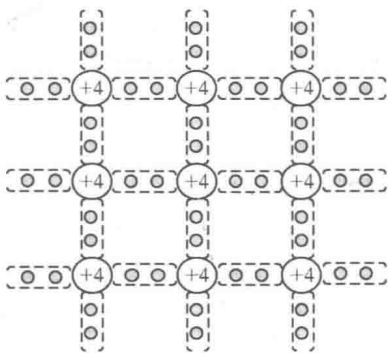


图 1-3 二维共价键结构示意图

量子力学证明:原子中电子具有的能量状态是离散的、量子化的,每一个能量状态对应于一个能级,一系列能级形成能带。

在 Si 或 Ge 单晶体中,价电子被束缚在共价键的状态,其能量状态较低,每一个能量状态占有一个能级,能级是量子化的,价电子可能占有的能级位于较低的有限能带内,该能带称为价带。而自由电子处于自由状态,其能量状态较高,自由电子可能占有的能级也是量子化的,位于较高的能带内,该能带称为导带。图 1-4 示出了电子的能级分布图,图中一系列的水平线表示不同的能级,其高度代表能量的高低。由图可以看出,价电子至少要获得 E_g 的能量才能挣脱共价键的束缚而成为自由电子,因此自由电子所占有

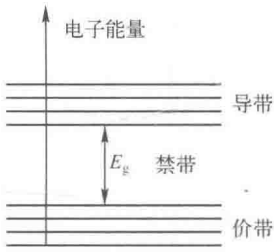


图 1-4 价电子能带图

的最低能级要比价电子可能占有的最高能级高出 E_g 。于是 Si(或 Ge) 晶体的能量分布中有一段间隙不可能被电子所占有,其宽度为 E_g ,称为禁带宽度。一般 E_g 与半导体材料的类别和温度 T 有关。例如:当 $T=0\text{ K}$ (-273.16°C) 时,可用 E_{g0} 表示禁带宽度,此时 Si 的 $E_{g0}=1.21\text{ eV}$, Ge 的 $E_{g0}=0.785\text{ eV}$ 。在室温 $T=300\text{ K}$ 时, Si 的 $E_g=1.12\text{ eV}$, Ge 的 $E_g=0.72\text{ eV}$ 。可以看出, E_g 随温度的增加而减小;在相同的温度下 Ge 的 E_g 比 Si 的 E_g 更小。

2. 本征激发和两种载流子

在热力学温度 $T=0\text{ K}$,且无外界其他能量激发时,由于 E_{g0} 较大,价电子全部被束缚在共价键中,能量状态位于价带,导带中无自由电子,因而在晶体中没有能自由运动的带电粒子——载流子,此时的本征半导体相当于绝缘体。但是当本征半导体受热或光照等其他能量激发时,某些共价键中的价电子可能会从外界获得足够的能量(获得的动能大于等于 E_g),价电子受激发挣脱共价键的束缚,离开原子,跃迁到导带成为能参与导电的自由电子;同时在共价键中留下相同数量的空位,上述现象称为本征激发,如图 1-5 所示。图 1-6 用能带图示意了本征激发过程。

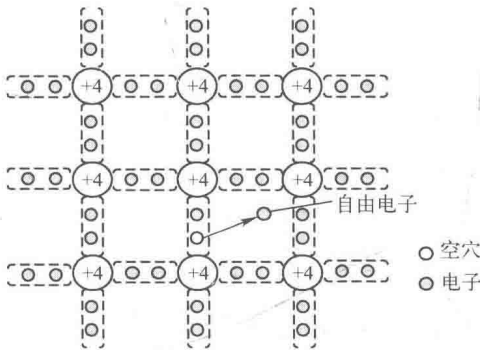


图 1-5 本征激发中的自由电子和空穴对

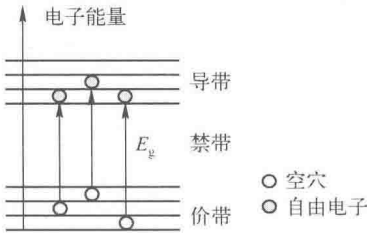


图 1-6 用能带图示意本征激发

当共价键中留下空位时,在外加电场或其他能源作用下,邻近共价键中的价电子就可能来补充这个空位,这个空位会消失(称作复合),同时在邻近的共价键中产生新的空位,而新空位周围的其他价电子都有可能填充到这个空位上。这样继续下去就相当于空位在硅或锗单晶体中随机运动。由于带负电荷的价电子依次填补空位的运动效果与带正电荷的粒子做反向运动的效果是相同的,因此把这种空位看做带正电荷的粒子,并称做空穴。

一般把物体内运载电荷的粒子称做载流子,载流子决定着物体的导电能力。在常温下本征半导体内具有两种载流子:自由电子载流子和空穴载流子。自由电子带单位负电荷;空穴是半导体中所特有的带单位正电荷的粒子,与自由电子电量相等,符号相反,带单位正电荷。在外电场作用下电子、空穴运动方向相反,但对电流的贡献是叠加的。

本征激发的重要特征是,自由电子和空穴两种载流子总是成对产生。可见,常温下本征半导体中存在电子和空穴两种载流子,不再是绝缘体。但是,一般由于本征激发所产生的电子-空穴对数量(浓度)很少,因此本征半导体的导电能力很差。

3. 本征载流子(intrinsic carrier) 浓度

由于本征激发在本征半导体中产生自由电子-空穴对的同时,还会出现另一种现象:自由

电子和空穴在运动过程中的随机相遇,使自由电子释放原来获取的激发能量,从导带跌入价带,填充共价键中的空穴,电子-空穴对消失,这种现象称为复合。在一定的温度下,本征半导体中的自由电子和空穴成对产生和复合的运动都在不停地进行,最终要达到一种热平衡状态,使本征半导体中的载流子浓度处于某一热平衡的统计值。

本征激发和复合是本征半导体中电子-空穴对的两种矛盾运动形式,在本征半导体中电子和空穴的浓度总是相等的。若设 n_i 为本征半导体热平衡状态时的电子浓度, p_i 为空穴浓度,本征载流子的浓度可用下式表示:

$$n_i = p_i = A_0 T^{3/2} \exp(-E_{g0}/2kT) \quad (1-1)$$

式中, A_0 为常数,与半导体材料有关, Si 的 $A_0 = 3.88 \times 10^{16} (\text{cm}^{-3} \text{K}^{-2/3})$, Ge 的 $A_0 = 1.76 \times 10^{16} (\text{cm}^{-3} \text{K}^{-2/3})$; k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} (\text{JK}^{-1})$ 。

在室温 $T = 300 \text{ K}$ 时,由式(1-1)可推算出

$$\text{Si: } n_i = p_i \approx 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3 \quad \text{Ge: } n_i = p_i \approx 2.4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

上述分析表明:

(1) 锗(Ge)半导体材料的本征载流子浓度大于硅(Si)半导体材料的本征载流子浓度。因此锗(Ge)半导体对本征激发的敏感性要强于硅(Si)半导体。

(2) $T \uparrow \rightarrow n_i$ (或 p_i) $\uparrow \rightarrow$ 半导体导电能力 $\uparrow$, 利用此特性可制作半导体热敏元器件;但 n_i (或 p_i) 随 T 的变化会影响半导体器件的稳定性,因而在电子电路的设计和集成电路的制造工艺中,经常要采取很多措施来克服或减少这种热敏效应。

(3) 光照 $\uparrow \rightarrow n_i$ (或 p_i) $\uparrow \rightarrow$ 导电能力 $\uparrow$, 利用此特性可制作出半导体的各类光电器件。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中人为地掺入一定量杂质成分的半导体称为杂质半导体(donor and acceptor impurities)。实际上,制造半导体器件的材料并不是本征半导体,而是掺入一定杂质成分的半导体。原因是由于在室温下本征半导体(Si)的载流子浓度 $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$, 与其原子密度 $4.96 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 相比,仅为原子密度的 $1/(3.3 \times 10^{12})$ 。故本征半导体的导电能力很弱。为了提高半导体材料的导电能力,可在本征半导体中掺入少量其他元素(称为杂质),这样会使半导体材料的导电能力显著改善。

在本征半导体中掺入不同种类的杂质可以改变半导体中两种载流子的浓度。根据掺入杂质的种类的不同,半导体可分为 N 型半导体(掺入五价元素杂质)和 P 型半导体(掺入三价元素杂质)。

1. N 型半导体(N Type semiconductor)

在本征半导体中掺入微量的五价元素的杂质(如砷、磷、锑等),能使杂质半导体中的自由电子浓度大大增加,因此称这种杂质半导体为电子型半导体或 N 型半导体。由于掺入的五价元素有 5 个价电子,当杂质原子替代晶格中某些硅的位置时,它的 5 个价电子中有 4 个与周围的硅原子构成共价键,多余的 1 个电子将不受共价键的束缚,而杂质原子核对此多余电子的束缚力也较弱。那么,在适当的温度(例如 -60°C)条件下,这个多余电子就可能被激发成为自由电子,与此同时杂质原子将被电离成带正电荷的不能运动的离子,如图 1-7 所示。因杂质原子可提供电子,故称施主原子,五价元素的杂质称为施主杂质。根据理论计算和实验结果,掺入五价元素产生的多余电子所占有的能级较高,很靠近导带底部,称为施主能级。一般施主

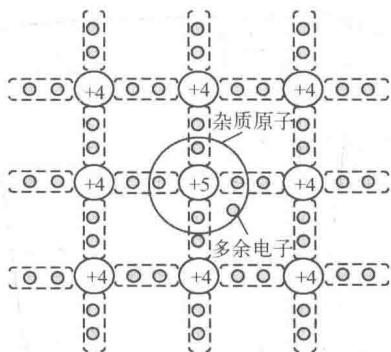


图 1-7 N 型半导体示意图

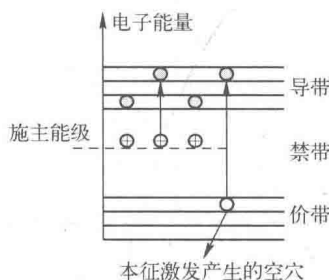


图 1-8 N 型半导体能带图

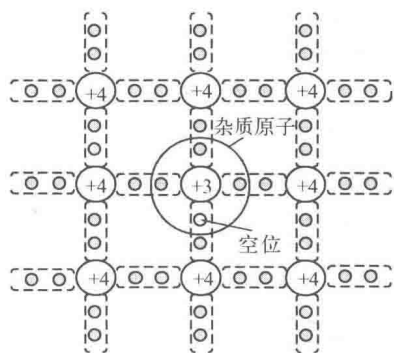
能级与导带底部的差值要比禁带宽度 E_g 小得多(例如,在硅中掺入五价砷,差值为 0.049 eV,掺入锑,差值为 0.039 eV;在锗中掺入磷,差值为 0.012 eV),故在一定温度(室温)时,每个掺入的五价杂质原子的多余电子都有足够的能量进入导带而成为自由电子。所以导带中自由电子的数量要比本征半导体显著增多。

如图 1-8 所示,与本征激发不同之处是:施主原子释放出的自由电子不是共价键内的价电子,所以不会在价带中产生空穴。另外,施主原子释放多余电子成为正离子,并被束缚在晶格中,不能像空穴那样起导电作用。还需说明,在杂质半导体中同时也存在着本征激发。

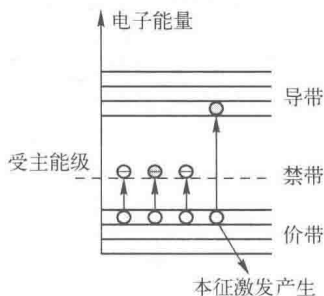
掺入的五价杂质元素越多,增加的自由电子数越多,自由电子浓度越大;而由本征激发产生的空穴与它们相遇的机会就增多,复合掉的空穴数量也就增多,因而该杂质半导体中的空穴浓度反倒比同温度下的本征空穴浓度小得多,自由电子浓度比同温度下的本征电子浓度大很多。因此,掺入五价元素后的杂质半导体是以自由电子作为主要载流子的半导体,故称为电子型或 N 型半导体。在 N 型半导体中的自由电子称为多数载流子,简称多子;空穴称为少数载流子,简称少子。

2. P 型半导体 (P type semiconductor)

在本征半导体中掺入少量三价元素(如硼、镓、铝等),能使杂质半导体中的空穴浓度大大增加,因而称为空穴型半导体或 P 型半导体。如图 1-9(a)所示,三价杂质原子的 3 个价电子与周围的硅或锗原子构成 4 个共价键时,由于缺少 1 个价电子,产生 1 个空位,在一定温度下,此空位极易接受来自相邻硅或锗原子共价键中的价电子,从而产生 1 个空穴。三价杂质原子



(a) 示意图



(b) 能带图

图 1-9 P 型半导体