



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
国家级精品资源共享课“电子技术基础”系列教材

模拟电子技术基础

(第2版)

• 毕满清 主编 • 王黎明 高文华 副主编
• 韩 焱 主审



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
国家级精品资源共享课“电子技术基础”系列教

模拟电子技术基础

(第2版)

主 编	毕满清		
副主编	王黎明	高文华	
参 编	韩跃平	任青莲	曹俊琴
	李瑞红	赵英亮	庞存锁
主 审	韩 焱		

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,也是国家级精品资源共享课“电子技术基础”系列教材之一。

全书共 11 章,包括:半导体二极管及其基本电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路和集成运算放大器、放大电路的频率特性、反馈和负反馈放大电路、集成运放组成的运算电路、信号检测与处理电路、波形发生电路、功率放大电路、直流电源。本着保证基础、加强集成、体现先进、联系实际、便于教学的编写原则,本书在内容上做到强调基本概念,重视电路分析方法,进一步做到经典与现代融合,与实验融合,与工程应用融合,强化了集成运放的应用,增加了典型应用电路的分析和 EDA 仿真内容,满足了应用型人才培养的需求。

每章先综述该章介绍的内容、要讨论的主要问题,达到的目的,然后进行正文叙述,做到知识点和例题有机结合,每节后面有思考题,最后进行小结,并附有自测题、习题的编写思路,达到有的放矢、循序渐进、前后呼应,力求解决学生学习“模拟电子技术”入门难和学习难的问题。

本书可与韩焱主编的《数字电子技术基础(第 2 版)》配套使用,可作为高等学校电气信息类、电子信息类及其他相近专业本科生教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。

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/毕满清主编. —2 版. —北京:电子工业出版社,2015. 2
ISBN 978-7-121-25393-5

I. ①模… II. ①毕… 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 009705 号

策划编辑:章海涛

责任编辑:章海涛 特约编辑:曹剑锋

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

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:26.75 字数:750 千字

版 次:2008 年 6 月第 1 版

2015 年 2 月第 2 版

印 次:2015 年 2 月第 1 次印刷

定 价:45.00 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。

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

服务热线:(010)88258888。

第2版前言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是国家级精品资源共享课“电子技术基础”系列教材之一。

按照高等学校电子技术基础课程(模拟电子技术基础)教学基本要求和第1版使用情况,跟踪电子技术发展的新形势和教学改革不断深入的需要,针对加强学生的理论基础、实践能力和创新能力培养,我们进一步研究了什么是本课程的基础知识和核心内容,如何在课程中为工程应用打好基础,在电子技术发展的新形势下,如何更好地处理基础与发展、基础知识与实际应用、理论与实践三大主题,进行编写的。

多年的电子技术教学改革和国家级精品课程、电工电子国家级实验教学示范中心(<http://eetes.nuc.edu.cn>)和国家级精品资源共享课(<http://www.icourses.cn>)建设的实践,为教材的编写和修订奠定了良好的基础,提供了有利条件。

考虑到素质教育的特点,在修订时,既要保持已有的比较成熟的体系,又要面向新的发展;既要符合本门课程的基本要求,又要适当引进电子技术的新器件、新技术、新方法;既要使学生掌握基础知识,又要培养他们的定性分析能力、综合应用能力和创新意识;既要有利于教师对本教材的灵活使用,更要有利于学生对本教材内容的主动学习和思考,所以本教材的编写原则是:保证基础、体现先进、联系实际、引导创新、便于教学。

① 各章的顺序按照“先器件后电路,先小信号后大信号,先基础后应用”的原则安排,围绕信号的放大、运算、处理、转换和产生进行介绍,体现了组成模拟电子系统的规律性。

② 在内容上编排保持原有的特色,每章先综述该章介绍的内容、要讨论的主要问题、达到的目的,然后进行正文叙述,做到知识点与例题有机结合,每节后面有思考题,最后进行小结,并附有自测题。其中,例题、思考题和习题在第1版编写思路的基础上进行了优化,力图使难易程度更有层次,在题型上更多样化,在提问题的角度上更有启发性,充分体现普通院校因材施教的特点,进一步解决学生学习模拟电子技术入门难、学习难的问题,并有助于培养学生运用知识分析问题和解决问题的能力。

③ 进一步做到经典与现代融合,与实验融合,与工程应用融合,强化了集成运放的应用,增加了典型应用电路的分析,体现了应用型人才培养的需求。

④ 加强了EDA技术,重要章节增加了EDA仿真分析内容。

有关EDA软件方面的内容,可与毕满清主编的《电子技术实验与课程设计》(第4版)配套使用。

书中标有*部分为选学内容,教师可根据专业要求、学时数以及学生层次的不同进行灵活处理。

参加本书修订编写工作的有:中北大学毕满清(第6章)、王黎明(第8章)、韩跃平(第4

章)、李瑞红(第5章)、赵英亮(第9、11章)、庞存锁(第7章),太原科技大学高文华(第2章)、任青莲(第1、3章)、曹俊琴(第10章)。毕满清任主编,负责全书的组织、修改和定稿,王黎明、高文华任副主编。

本书由教育部电子信息类专业教学指导委员会委员、中北大学副校长、博士生导师韩焱教授担任主审,对书稿进行了非常认真细致的审查,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书为任课教师提供配套的教学资源(包含教学大纲、课程视频、电子教案等),需要者可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)或爱课程网(<http://www.icourses.cn>),注册之后可进行免费下载。

由于我们的能力和水平有限,书中难免会有不妥之处和错误,恳请广大师生和本书读者提出批评和改进意见。

作者

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本电路	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结及其特性	3
1.2 半导体二极管	7
1.2.1 半导体二极管的结构和类型	7
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	8
1.2.3 温度对二极管伏安特性的影响	9
1.2.4 半导体二极管的主要参数	9
1.2.5 半导体器件的型号及二极管的选择	10
1.2.6 半导体二极管的模型	10
1.3 半导体二极管的应用	13
1.3.1 二极管在限幅电路中的应用	13
1.3.2 二极管在整流电路中的应用	16
1.4 特殊二极管	17
1.4.1 稳压二极管	17
1.4.2 发光二极管	20
1.4.3 光电二极管	20
1.4.4 变容二极管	20
本章小结	20
自测题	21
习题 1	22
第 2 章 双极型晶体管及其基本放大电路	25
2.1 双极型晶体管	25
2.1.1 晶体管的结构及其类型	25
2.1.2 晶体管的三种连接方式	26
2.1.3 晶体管的工作状态	27
2.1.4 晶体管的伏安特性曲线	31
2.1.5 晶体管的直流模型	33
2.1.6 晶体管的主要参数	34
2.1.7 温度对晶体管参数的影响	36
2.1.8 晶体管的选用原则	38
2.2 放大的概念及放大电路的性能指标	39
2.2.1 放大的基本概念	39
2.2.2 放大电路的主要性能指标	39

2.3 共发射极放大电路的组成及工作原理	42
2.3.1 共发射极放大电路的组成	42
2.3.2 共发射极放大电路的工作原理	44
2.3.3 直流通路和交流通路	46
2.4 放大电路的图解分析法	48
2.4.1 静态分析	48
2.4.2 动态分析	49
2.4.3 电路参数对静态工作点的影响	51
2.4.4 非线性失真	53
2.4.5 最大输出电压幅值	54
2.5 放大电路的微变等效电路分析法	56
2.5.1 晶体管的低频小信号微变等效模型	57
2.5.2 共发射极放大电路的分析	60
2.6 分压式稳定静态工作点电路	62
2.6.1 温度对静态工作点的影响	62
2.6.2 分压式射极偏置稳定电路	63
2.6.3 带旁路电容的射极偏置稳定电路	65
2.7 共集电极放大电路	66
2.7.1 共集电极放大电路	66
2.7.2 自举式射极输出器	68
2.8 共基极放大电路	71
2.8.1 共基极放大电路	71
2.8.2 三种基本组态放大电路的比较	72
2.9 组合单元放大电路	73
2.9.1 复合管	73
2.9.2 共集-共射和共射-共集组合放大电路	74
2.9.3 共射-共基组合放大电路	75
2.10 分压式共射放大电路的仿真分析	79
2.10.1 静态工作点设置	79
2.10.2 有旁路电容时电路的动态性能指标	81
2.10.3 无旁路电容时电路的动态性能指标	81
2.11 自举式射极输出器仿真分析	82
2.11.1 有自举电容时电路的输入电阻	83
2.11.2 无自举电容时电路的输入电阻	83
本章小结	83
自测题	85
习题2	86
第3章 场效应管及其基本放大电路	95
3.1 结型场效应管	95
3.1.1 结型场效应管的结构及类型	95
3.1.2 结型场效应管的工作原理	96

3.1.3	结型场效应管的伏安特性	98
3.1.4	结型场效应管的主要参数	99
3.2	绝缘栅场效应管	100
3.2.1	增强型 MOS 管	100
3.2.2	耗尽型 MOS 管	102
3.2.3	场效应管与晶体管的比较	105
3.3	场效应管放大电路	106
3.3.1	场效应管放大电路的直流偏置与静态分析	106
3.3.2	场效应管放大电路的动态分析	108
	本章小结	113
	自测题	113
	习题 3	114
第 4 章	多级放大电路和集成运算放大器	117
4.1	多级放大电路	117
4.1.1	级间耦合	117
4.1.2	多级放大电路的分析方法	121
4.1.3	其他多级放大电路	125
4.2	集成运算放大器概述	127
4.2.1	集成电路简介	127
4.2.2	集成运算放大器的基本组成	128
4.3	差动放大电路	129
4.3.1	电路组成及抑制零点漂移的原理	129
4.3.2	射极耦合差动放大电路的静态分析	132
4.3.3	射极耦合差动放大电路的动态分析	133
4.3.4	差动放大电路的四种接法	135
4.3.5	差动放大电路的调零	138
4.3.6	采用恒流源的差动放大电路	141
4.4	电流源电路	144
4.4.1	镜像电流源	144
4.4.2	微电流源	145
4.4.3	场效应管电流源	146
4.4.4	电流源用做有源负载	146
4.5	通用集成运算放大器	146
4.5.1	集成运算放大器的发展概况	146
4.5.2	通用集成运算放大器的典型电路	147
4.6	集成运算放大器的主要参数和低频等效电路	148
4.6.1	集成运算放大器的主要参数	148
4.6.2	集成运算放大器的低频等效电路	150
4.7	CMOS 集成运算放大器	151
	本章小结	152
	自测题	153

习题4	154
第5章 放大电路的频率特性	158
5.1 概述	158
5.1.1 频率特性的基本概念	158
5.1.2 放大电路频率特性的研究方法	159
5.1.3 单时间常数 RC 电路的频率特性	160
5.2 晶体管的高频小信号等效电路	164
5.2.1 晶体管混合 π 形等效电路的引出	164
5.2.2 晶体管混合 π 形等效电路的参数	165
5.2.3 晶体管混合 π 形等效电路的简化	165
5.2.4 晶体管电流放大系数 β 的频率特性	166
5.3 单管共射放大电路的频率特性	168
5.4 放大电路的增益带宽积	173
5.4.1 对放大电路频率特性的要求	173
5.4.2 放大电路频率特性的改善	174
5.4.3 放大电路的增益带宽积	174
5.5 多级放大电路的频率特性	174
5.5.1 多级放大电路频率特性的表达式和截止频率	175
5.5.2 多级放大电路的通频带	176
5.6 放大电路的频率特性仿真	176
5.6.1 单管共射放大电路的频率特性仿真	177
5.6.2 共射—共射两级放大电路的频率特性仿真	180
本章小结	182
自测题	183
习题5	184
第6章 反馈及负反馈放大电路	187
6.1 反馈的基本概念	187
6.2 反馈的分类及其判断	188
6.2.1 反馈的分类	188
6.2.2 反馈的判断	189
6.2.3 负反馈的四种类型	191
6.3 负反馈放大电路的基本关系式	194
6.3.1 方框图表示法	194
6.3.2 基本关系式	195
6.4 负反馈对放大电路性能的影响	197
6.4.1 提高放大倍数的稳定性	198
6.4.2 扩展通频带	199
6.4.3 减小非线性失真	200
6.4.4 抑制内部噪声和干扰	201
6.4.5 对输入电阻和输出电阻的影响	201
6.5 负反馈的正确引入	205

6.5.1 引入原则	205
6.5.2 举例	205
6.6 负反馈放大电路的分析计算	207
6.6.1 估算的依据	207
6.6.2 深度负反馈放大电路的近似计算	207
6.7 负反馈放大电路的自激振荡	211
6.7.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作条件	211
6.7.2 负反馈放大电路的稳定裕度	212
6.7.3 常用消除自激的方法	213
6.8 负反馈放大电路性能的仿真研究	215
6.8.1 放大电路开环特性仿真研究	215
6.8.2 放大电路闭环特性仿真研究	219
本章小结	220
自测题	221
习题6	222
第7章 集成运放组成的运算电路	227
7.1 概述	227
7.1.1 线性应用及其特点	227
7.1.2 非线性应用及其特点	228
7.2 基本运算电路	229
7.2.1 比例运算电路	229
7.2.2 加法运算电路和减法运算电路	232
7.2.3 反相输入运算电路的一般规律	234
7.2.4 积分和微分运算电路	235
7.3 对数和指数运算电路	238
7.3.1 对数运算电路	238
7.3.2 指数运算电路	239
7.4 模拟乘法器及其应用	239
7.4.1 模拟乘法器电路	239
7.4.2 单片集成模拟乘法器	242
7.4.3 模拟乘法器的应用	243
7.5 除法运算电路	245
7.5.1 对数和指数电路组成的除法运算电路	245
7.5.2 反函数型除法运算电路	245
7.6 集成运放实际应用中的几个问题	246
7.6.1 器件的选用	246
7.6.2 自激振荡的消除	246
7.6.3 调零	247
7.6.4 保护措施	247
7.6.5 单电源供电时的偏置问题	248
7.7 运算放大电路的仿真分析	248

7.7.1 反相比例运算电路	249
7.7.2 同相比例运算电路	249
7.7.3 差分比例运算电路(减法运算电路)	250
7.7.4 积分运算电路	250
本章小结	250
自测题	251
习题7	252
第8章 信号检测与处理电路	257
*8.1 信号检测系统中的放大电路	257
8.1.1 精密仪用放大器	257
8.1.2 电荷放大器	259
8.1.3 采样保持电路	260
8.1.4 精密整流电路	261
8.2 有源滤波电路	262
8.2.1 滤波电路的基础知识	262
8.2.2 低通滤波器	264
8.2.3 高通滤波器	267
8.2.4 带通、带阻及全通滤波器	268
*8.2.5 开关电容滤波器	272
8.2.6 无限增益的有源滤波电路	273
8.2.7 集成有源滤波器	274
8.3 电压比较器	276
8.3.1 概述	276
8.3.2 单阈值电压比较器	277
8.3.3 滞回比较器	279
8.3.4 窗口比较器	282
8.3.5 单片集成电压比较器	282
8.4 有源滤波电路和电压比较器的仿真分析	283
8.4.1 有源滤波电路的仿真分析	283
8.4.2 电压比较电路的仿真分析	288
8.5 数据采集电路实例	291
8.5.1 心电采集系统总体电路	291
8.5.2 前置放大电路设计	293
8.5.3 前置滤波电路设计	293
8.5.4 主放大电路设计	294
8.5.5 50 Hz 陷波电路设计	295
本章小结	296
自测题	296
习题8	297
第9章 波形发生电路	301
9.1 概述	301

9.2 正弦波振荡电路	302
9.2.1 正弦波振荡电路的基本工作原理	302
9.2.2 RC 正弦波振荡电路	303
9.2.3 LC 正弦波振荡电路	307
9.2.4 石英晶体振荡电路	317
9.3 非正弦波发生电路	319
9.3.1 非正弦波发生电路的基本概念	320
9.3.2 矩形波发生电路	320
9.3.3 三角波发生电路	323
9.3.4 锯齿波发生电路	324
9.3.5 集成函数发生器	325
9.4 正弦波振荡电路的仿真与测试	327
9.5 典型应用实例——调频无线话筒设计	332
9.5.1 调频无线话筒工作原理及电路图	332
9.5.2 仿真结果	332
本章小结	334
自测题	335
习题9	336
第10章 功率放大电路	341
10.1 功率放大电路的特殊问题及其分类	341
10.1.1 功率放大电路的特殊问题	341
10.1.2 功率放大电路的分类	342
10.2 互补对称功率放大电路	344
10.2.1 互补对称功率放大电路的引出	344
10.2.2 乙类互补对称功率放大电路	346
10.2.3 甲乙类互补对称功率放大电路	354
10.2.4 OCL 准互补对称功率放大电路	357
10.3 集成功率放大器	358
10.3.1 LM386 集成功率放大器	358
10.3.2 其他集成功率放大器	360
* 10.4 功率管的散热与二次击穿	362
10.4.1 功率管的散热	362
10.4.2 功率管的二次击穿	364
10.5 功率放大电路典型应用实例	365
10.5.1 OCL 实用功率放大电路	365
10.5.2 OTL 实用功率放大电路	366
本章小结	367
自测题	368
习题10	369
第11章 直流电源	371
11.1 概述	371

11.2 整流电路	372
11.2.1 基本概念	372
11.2.2 单相半波整流电路	372
11.2.3 单相桥式整流电路	374
11.2.4 倍压整流电路	377
11.3 滤波电路	378
11.3.1 电容滤波电路	379
11.3.2 其他滤波电路	382
11.4 稳压电路	383
11.4.1 稳压电路的性能参数	383
11.4.2 稳压管稳压电路	384
11.4.3 串联型稳压电路	387
11.5 三端稳压电路	392
11.5.1 固定式三端稳压器	392
11.5.2 可调式三端稳压器	398
*11.6 开关型稳压电路	400
11.6.1 串联式开关型稳压电路	401
11.6.2 并联式开关型稳压电路	403
11.7 直流稳压电源仿真分析	404
11.8 直流稳压电源典型应用实例	407
本章小结	409
自测题	410
习题 11	411
参考文献	414

第1章 半导体二极管及其基本电路

内 容 提 要

本章先介绍半导体的基础知识,然后重点阐述半导体二极管的单向导电性、伏安特性、主要参数及其在模拟电路中的应用,最后讨论在模拟电路中广泛应用的几种特殊二极管。

讨论的主要问题

- 杂质半导体为什么有两种载流子?
- PN结是怎样形成的?
- PN结的伏安特性满足欧姆定律吗? PN结为什么具有单向导电性? PN结的伏安特性与温度的关系怎样?
- 常用二极管的模型有哪些? 分别适用于哪些场合?
- 稳压管的稳压原理是什么?

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 本征半导体

1. 半导体及其特性

物质按照其导电能力可以分为导体、半导体和绝缘体三种类型。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体。

半导体之所以被用来制造电子元器件是因为它具有不同于其他物质的特性。

(1) **光敏特性** 光照可以使半导体的导电能力改变。利用这种特性,半导体可以被制成各种光敏器件,如光敏电阻、光电耦合器和光电晶体管等。

(2) **热敏特性** 有些半导体对温度的反应特别灵敏,温度的变化会使半导体的导电能力产生变化。利用这种特性,半导体可以被制成各种热敏元件。

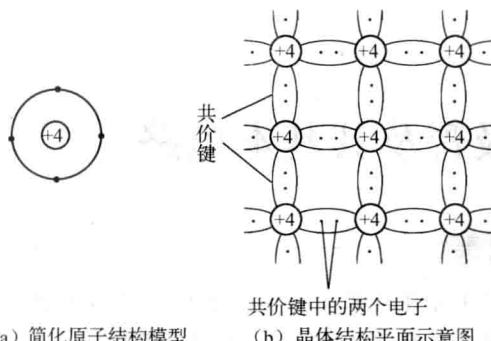
(3) **掺杂特性** 在纯净的半导体中掺入少量特定的杂质元素时,其导电能力具有可控性。控制掺入杂质元素的浓度,就可控制半导体的导电性能。利用这种特性,半导体可以被制成各种性能的半导体器件。

2. 本征半导体的晶体结构

用物理方法,使半导体材料的原子按结晶方式规则地排列,形成的半导体晶体叫做单晶体。如果半导体材料中的原子排列不规则,则形成的半导体晶体叫做多晶体。高度提纯、结构完整的半导体单晶体叫做本征半导体。

常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。硅和锗都是四价元素,每个原子的最外层具有4个电子。物理学中将最外层电子叫做价电子,把内层电子和原子核两部分合在一起称为惯性核,由此可得硅和锗的原子结构的简化模型,如图1-1(a)所示。外层表示价电子数,“+4”表示惯性核,其电荷量(+4)是原子核以及除价电子以外的内层电子电荷量的总和。

硅和锗在使用时都要做成本征半导体。在组成本征半导体时,硅(锗)原子按一定规律整齐排列,组成一定形式的空间点阵。每个硅(锗)原子最外层的4个价电子与相邻的4个硅(锗)原子的



(a) 简化原子结构模型 (b) 晶体结构平面示意图

图 1-1 硅和锗的简化原子结构模型和晶体结构
 图 1-1 硅和锗的简化原子结构模型和晶体结构
 运动的带电粒子——载流子 (Carrier), 因而在外电场作用时不会产生电流。在这种条件下, 本征半导体不能导电。

(2) 本征半导体受激发产生载流子——自由电子和空穴 在获得一定的能量 (热、光等) 后, 少量价电子即可挣脱共价键的束缚成为自由电子。同时, 在共价键中留下一个空位, 称为空穴 (Hole)。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

① 本征半导体中的自由电子载流子 价电子挣脱共价键后成为自由电子。自由电子带负电, 在外电场的作用下, 自由电子将逆着电场方向定向运动, 形成电子电流。因此, 自由电子是本征半导体中的一种载流子。

② 本征半导体中的空穴载流子 由于空穴的存在, 在外加电场的作用下, 处于共价键上的价电子也按一定方向依次填补空穴。例如, 在图 1-2 中, 如果在 A 处出现一个空穴, 则 B 处的电子填补 A 处的空穴, 从而使空穴由 A 移到 B。如果 C 处电子再填补 B 处空穴, 由此空穴又从 B 移到 C。因此, 在半导体中出现了价电子填补空穴的运动, 相当于空穴在与价电子运动相反的方向上运动。

从电荷平衡的角度看, 可把空穴看成一个带正电的粒子, 所带电量与电子相等, 极性相反。分析时, 把这种运动形成的电流叫做“空穴电流”。因此, 空穴也是一种载流子。

由此可见, 在本征半导体中有两种载流子: 带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。它们是成对出现的, 通常称为电子空穴对, 其浓度相等。另外, 由于两者电荷量相等, 极性相反, 所以本征半导体呈电中性。

4. 本征半导体中载流子的浓度

本征半导体受外界能量的激发产生电子空穴对, 这种现象称为本征激发。自由电子在无规则的热运动中如果与空穴相遇就会填补空穴, 使电子空穴对消失, 这种现象称为复合。当温度一定时, 由本征激发产生的电子空穴对与复合的电子空穴对数目相等, 使激发和复合达到动态平衡。此时, 本征半导体中自由电子和空穴的浓度 (即载流子的浓度) 是一定的, 并且相等。

半导体中载流子的浓度用单位体积中载流子的个数来表示。通常, 分别用自由电子浓度 n_i 和空穴浓度 p_i 表示本征半导体中载流子的浓度。在常温下, 即 $T=300\text{ K}$ 时, 本征硅的载流子浓度为 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$, 本征锗的载流子浓度为 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 。

本征半导体的载流子浓度受温度的影响很大, 随着温度的升高, 载流子的浓度基本按指数规律增加。理论分析和实验表明: 对于硅材料, 温度每升高 8°C , 硅的载流子浓度约增加 1 倍; 对于锗材料, 温度每升高 12°C , 锗的载流子浓度约增加 1 倍。所以, 温度是影响半导体导电性能的重要因素。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体有自由电子和空穴两种载流子, 但由于浓度很低, 导电能力仍然很差, 因而不宜在

各一个价电子形成 4 对共价键结构。共价键中的电子受两个原子核引力的束缚, 使得每个硅 (锗) 原子最外层形成拥有 8 个共有电子的稳定结构。图 1-1 (b) 为晶体共价键结构的平面示意图。

3. 本征半导体中的两种载流子

(1) 在绝对零度和无外界激发时, 本征半导体中无载流子 共价键内的两个电子称为束缚电子。共价键有很强的结合力, 如果没有足够的能量, 则价电子不能挣脱原子核的束缚成为自由电子。此时, 在本征半导体中, 没有可以自由运动的带电粒子——载流子 (Carrier), 因而在外电场作用时不会产生电流。在这种条件下, 本征半导体不能导电。

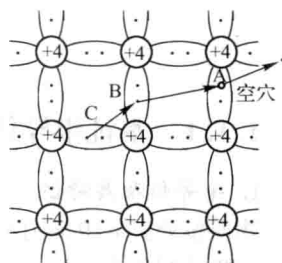


图 1-2 电子和空穴的移动

半导体器件制造中直接使用。如果在本征半导体中掺入微量的某种元素(杂质),就会使半导体的导电性能发生显著变化,而这种掺入杂质的半导体叫做“杂质半导体”。按掺入杂质元素的不同,杂质半导体可分为N型半导体(电子半导体)和P型半导体(空穴半导体)两大类。

1. N型半导体

(1) 本征半导体中掺入微量的五价元素,构成N型半导体 按照一定的工艺,在本征硅(锗)中掺入微量的五价元素,如磷(P)、砷(As)等。由于杂质原子的最外层有5个价电子,则晶体点阵中的某些位置上,杂质原子取代硅(锗)原子,有4个价电子与相邻的硅(锗)原子的4个价电子组成共价键,多余的1个价电子处于共价键之外,如图1-3所示。这个多余的电子不受共价键的束缚,只需要很少的能量就能成为自由电子,但在产生自由电子的同时并不产生新的空穴。这样,每个杂质原子都能提供一个自由电子,从而使半导体中的自由电子数量大大增加。因此,杂质半导体的导电能力也大大增强。

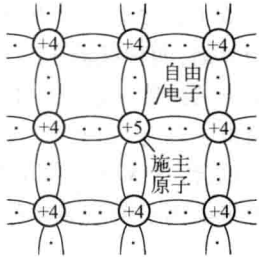


图1-3 N型半导体

(2) N型半导体中的“多子”(自由电子)和“少子”(空穴) 除了杂质原子提供的自由电子外,在半导体中还有少量由本征激发产生的电子空穴对。但由于增加了许多额外的自由电子,因此在N型半导体中自由电子数远大于空穴数。这种半导体主要依靠自由电子导电,所以自由电子叫做“多数载流子”,简称“多子”;而空穴叫做“少数载流子”,简称“少子”。掺入的杂质越多,多子(自由电子)的浓度就越高,N型半导体的导电性能也就越强。

(3) N型半导体呈电中性 在N型半导体中,杂质原子可以提供电子,故称为施主原子。杂质原子失去电子后成为带正电荷的正离子,由原子核以及核外电子组成,处在晶体结构当中不能自由移动。因此,正离子不是载流子。N型半导体中的正电荷量(由正离子和本征激发的空穴所带)与负电荷量(由杂质原子施放的电子和本征激发的电子所带)相等,所以N型半导体呈电中性。

2. P型半导体

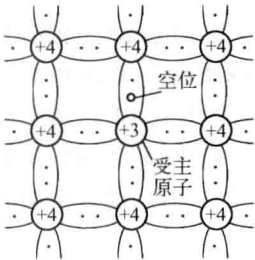


图1-4 P型半导体

(1) 本征半导体中,掺入微量的三价元素构成P型半导体 在本征半导体中掺入少量的三价元素,如硼(B)、镓(Ga)等,由于杂质原子的最外层只有3个价电子,在与周围硅(锗)原子组成共价键时,因缺少1个电子而产生一个空位,如图1-4所示。当受能量激发时,相邻共价键上的电子就可能填补这个空位,在电子原来所处的位置上产生一个空穴。在常温下,每个杂质原子都能引起一个空穴,从而使半导体中的空穴数量大大增加。

(2) P型半导体中的“多子”(空穴)和“少子”(自由电子) 在P型半导体中,尽管有本征激发产生的电子空穴对,但由于掺入的每个杂质原子都能引起一个空穴,因而空穴数远大于自由电子数。空穴导电成为这种半导体的主要导电方式,故空穴为多数载流子,而电子为少数载流子。控制掺入杂质的浓度,便可控制多数载流子空穴的数目。

(3) P型半导体呈电中性 在P型半导体中,杂质原子中的空位可以吸收电子,故称为受主原子。杂质原子吸收电子后成为带负电荷的负离子,但不能自由移动。因此,负离子不是载流子。P型半导体中的正电荷量(由硅(锗)原子失去电子形成的空穴和本征激发的空穴所带)与负电荷量(负离子和本征激发的电子所带)相等,所以P型半导体呈电中性。

在杂质半导体中,多子浓度主要取决于掺入杂质的浓度,掺入杂质越多,多子浓度就越大。而少子由本征激发产生,其浓度主要取决于温度,温度越高,少子浓度就越大。

1.1.3 PN结及其特性

1. PN结的形成

如果在一块本征半导体上,通过一定的工艺使其一边形成N型半导体,另一边形成P型半导