



国家精品课程“电子技术基础”主教材

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

模拟电子技术基础

毕满清 主编 王黎明 高文华 副主编 韩焱 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会推荐教材

模拟电子技术基础

第2版

清华大学出版社

国家精品课程“电子技术基础”主教材
电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

模拟电子技术基础

毕满清 主编

王黎明 高文华 副主编

韩跃平 任青莲 曹俊琴 参编

韩焱 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为国家精品课程“电子技术基础”主教材。

全书共分 11 章:半导体二极管及其基本电路、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、反馈及负反馈放大电路、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、功率放大电路和直流电源。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,本书在内容上强调基本概念,重视电路分析方法,注意电路与工程应用相结合。

每章先综述所介绍的内容和讨论的主要问题,然后进行正文叙述,知识点和例题有机结合。本书每节后面都有思考题,最后进行小结,并附有自测题、习题及解题思路,从而达到有的放矢、循序渐进、前后呼应的目的,力求解决学生掌握“模拟电子技术”的入门难和学习难的问题。

本书可作为高等学校电气信息类、电子信息类及其他相近专业的本科生教材,也可作为相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. —北京:电子工业出版社,2008.6

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-06600-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 109178 号

策划编辑:章海涛

责任编辑:章海涛 史平

印刷:北京东光印刷厂

装订:三河市鹏成印业有限公司

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 字数:666 千字

印次:2008 年 6 月第 1 次印刷

印数:4000 册 定价:35.00 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。

前 言

电子技术基础是电类各专业极其重要的专业基础课。随着人才市场对高等学校人才素质的要求,电子技术基础也成为部分非电类专业的必修课。当代电子技术的飞速发展和广泛应用,对本科生的教学提出了越来越高的要求。中北大学(原华北工学院)电子技术课程组多年来十分重视电子技术基础学科建设、注重教学改革与研究、注重教师队伍培养和教材建设、注重实践教学和能力培养、注重教学与科研的有机结合、重视与专业课程以及基础课程的交流,取得了一定成绩,受到同行专家的好评。2007年,“电子技术基础”课程(网址 <http://netschool.nuc.edu.cn/KJJD/dzjs>)被评为国家级精品课程,电工电子实验中心(网址 <http://eetec.nuc.edu.cn>)被评为国家级示范实验中心。

本书是按照教育部颁布的高等学校电子技术基础课程教学基本要求,结合我们多年来电子技术课程教学实践和经验,为适应电子技术发展的新形势和教学改革不断深入的需要,针对加强学生扎实的基础理论和实践能力培养而编写的。

本书的编写与国家精品课程和国家级示范实验室建设相结合,力求站在教学内容和课程体系改革与整体优化的高度来组织内容,使教材具有科学性、系统性、可读性与前瞻性。

本书编写的原则是:保证基础、加强集成、联系实际、体现先进和便于教学。

① 教材内容以集成电路为主,适当保留作为电子电路基础的分立元件电路内容,重点放在讨论各种基本放大电路及分析方法、放大电路中的反馈、模拟集成电路及其应用。

② 在介绍半导体器件工作原理、特性曲线和性能参数的基础上,引出半导体器件的模型,为电路分析和电路CAD打好基础。

③ 在分析由三极管、场效应管构成的放大电路时,强调基本概念、基本工作原理和基本分析方法,为学习后续电路和集成电路打下坚实的基础。

④ 在介绍集成运放基本单元电路和主要性能参数的基础上,强调集成运放的线性应用和非线性应用。

⑤ 为了激发学生的兴趣,并与所学专业相结合,引入了工程方面的内容,如信号检测中的仪表放大器、精密整流电路以及采样保持电路。

⑥ 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3版)配套使用。

⑦ 在编写方法上,每章先综述所介绍的内容、讨论的主要问题、要达到的目的,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、习题的解题思路,达到有的放矢、循序渐进、前后呼应的目的。力求解决学生学习模拟电子技术入门难和学习难的问题。

书中标*号部分为选学内容,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。

参加本书编写工作的有中北大学毕满清(第6章、第7章)、王黎明(第8章、第9章、第11章)、韩跃平(第4章、第5章)、太原科技大学高文华(第2章)、任青莲(第1章、第3章)、曹俊琴(第10章),庞存锁、刘彦参与整理了部分习题、答案及其他一些有关资料。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,协助主编工作。

教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员、中北大学副校长、博士生导师、国家精品课程“电子技术基础”负责人韩焱教授担任本书主审,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。

由于我们的能力和水平有限,加之时间仓促,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。

本书为教师提供配套的教学资源,包括电子课件、习题解答及扩展知识等。有需要者,请登录到华信教育资源网(<http://www.huaxin.edu.cn> 或 <http://www.hxedu.com.cn>),注册之后可下载电子课件,其他教学资源请发邮件至 unicode@phei.com.cn 索取。

编 者

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	3
1.1.3 PN 结及其特性	4
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 半导体二极管的结构和类型	8
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	9
1.2.3 温度对二极管伏安特性的影响	10
1.2.4 半导体二极管的主要参数	10
1.2.5 半导体器件的型号及二极管的 选择	11
1.2.6 半导体二极管的模型	12
1.3 半导体二极管的应用	15
1.3.1 二极管在限幅电路中的应用	15
1.3.2 二极管在整流电路中的应用	18
1.4 特殊二极管	19
1.4.1 稳压二极管	19
1.4.2 发光二极管	22
1.4.3 光电二极管	23
1.4.4 变容二极管	23
本章小结	23
自测题	24
习题	26
第 2 章 晶体管及其基本放大电路	28
2.1 晶体管	28
2.1.1 晶体管的结构及其类型	28
2.1.2 晶体管的三种连接方式	29
2.1.3 晶体管的工作状态	30
2.1.4 晶体管的伏安特性曲线	35
2.1.5 晶体管的直流模型	37
2.1.6 晶体管的主要参数	38
2.1.7 温度对晶体管参数的影响	40
2.1.8 晶体管的选用原则	42
2.2 放大的概念及放大电路的性能 指标	43
2.2.1 放大的基本概念	43
2.2.2 放大电路的主要性能指标	44
2.3 共发射极放大电路的组成及 工作原理	47
2.3.1 共发射极放大电路的组成	47
2.3.2 共发射极放大电路的工作原理	48
2.3.3 直流通路和交流通路	50
2.4 放大电路的图解分析法	53
2.4.1 静态分析	53
2.4.2 动态分析	54
2.4.3 电路参数对静态工作点的影响	56
2.4.4 非线性失真	58
2.4.5 最大输出电压幅值	59
2.5 放大电路的微变等效电路 分析法	62
2.5.1 晶体管的低频小信号微变等效 模型	62
2.5.2 共发射极放大电路的分析	66
2.6 分压式稳定静态工作点电路	68
2.6.1 温度对静态工作点的影响	68
2.6.2 分压式射极偏置稳定电路	68
2.6.3 带旁路电容的射极偏置稳定电路	71
2.7 共集电极放大电路	72
2.7.1 共集电极放大电路	72
2.7.2 自举式射极输出器	74
2.8 共基极放大电路	77
2.8.1 共基极放大电路	77
2.8.2 三种基本组态放大电路的比较	78
2.9 组合单元放大电路	79
2.9.1 复合管	79
2.9.2 共集-共射和共射-共集组合放大 电路	80
2.9.3 共射-共基组合放大电路	81
本章小结	86
自测题	87
习题	88

第3章 场效应管及其基本放大电路 ··· 97	4.5 通用集成运算放大器 ····· 153
3.1 结型场效应管 ····· 97	4.5.1 集成运算放大器的发展概况 ····· 153
3.1.1 结型场效应管的结构及类型 ····· 98	4.5.2 通用集成运算放大器的 典型电路 ····· 154
3.1.2 结型场效应管的工作原理 ····· 98	4.6 集成运算放大器的主要参数和 低频等效电路 ····· 156
3.1.3 结型场效应管的伏安特性 ····· 100	4.6.1 集成运算放大器的主要参数 ····· 156
3.1.4 结型场效应管的主要参数 ····· 101	4.6.2 集成运算放大器的低频等效 电路 ····· 157
3.2 绝缘栅场效应管 ····· 102	4.7 CMOS 集成运算放大器 ····· 158
3.2.1 增强型 MOS 管 ····· 103	本章小结 ····· 160
3.2.2 耗尽型 MOS 管 ····· 105	自测题 ····· 161
3.2.3 场效应管与晶体管的比较 ····· 106	习题 ····· 162
3.3 场效应管放大电路 ····· 109	第5章 放大电路的频率特性 ····· 166
3.3.1 场效应管放大电路的直流偏置与 静态分析 ····· 109	5.1 概述 ····· 166
3.3.2 场效应管放大电路的动态分析 ····· 112	5.1.1 频率特性的基本概念 ····· 166
本章小结 ····· 116	5.1.2 放大电路频率特性的研究方法 ····· 167
自测题 ····· 116	5.1.3 单时间常数 RC 电路的频率 特性 ····· 168
习题 ····· 118	5.2 晶体管的高频小信号等效 电路 ····· 172
第4章 多级放大电路和集成运算 放大器 ····· 121	5.2.1 晶体管混合 Π 形等效电路的 引出 ····· 172
4.1 多级放大电路 ····· 121	5.2.2 晶体管混合 Π 形等效电路的 参数 ····· 173
4.1.1 级间耦合 ····· 121	5.2.3 晶体管混合 Π 形等效电路的 简化 ····· 174
4.1.2 多级放大电路的分析方法 ····· 126	5.2.4 晶体管电流放大系数 β 的频率 特性 ····· 175
4.1.3 其他多级放大电路 ····· 130	5.3 单管共射放大电路的频率 特性 ····· 176
4.2 集成运算放大器概述 ····· 133	5.4 放大电路的增益带宽积 ····· 182
4.2.1 集成电路简介 ····· 133	5.4.1 对放大电路频率特性的 要求 ····· 182
4.2.2 集成运算放大器的基本组成 ····· 134	5.4.2 放大电路频率特性的改善 ····· 183
4.3 差动放大电路 ····· 135	5.4.3 放大电路的增益带宽积 ····· 183
4.3.1 电路组成及抑制零点漂移的 原理 ····· 135	5.5 多级放大电路的频率特性 ····· 184
4.3.2 射极耦合差动放大电路的 静态分析 ····· 138	5.5.1 多级放大电路频率特性的 表达式和截止频率 ····· 184
4.3.3 射极耦合差动放大电路的 动态分析 ····· 139	5.5.2 多级放大电路的通频带 ····· 185
4.3.4 差动放大电路的四种接法 ····· 142	本章小结 ····· 186
4.3.5 差动放大电路的调零 ····· 144	自测题 ····· 187
4.3.6 采用恒流源的差动放大电路 ····· 148	
4.4 电流源电路 ····· 151	
4.4.1 镜像电流源 ····· 151	
4.4.2 微电流源 ····· 153	
4.4.3 场效应管电流源 ····· 153	
4.4.4 电流源用做有源负载 ····· 153	

习题	190	7.3 对数和指数运算电路	242
第6章 反馈及负反馈放大电路	192	7.3.1 对数运算电路	242
6.1 反馈的基本概念	192	7.3.2 指数运算电路	243
6.2 反馈的分类及其判断	193	7.4 模拟乘法器及其应用	244
6.2.1 反馈的分类	193	7.4.1 模拟乘法器电路	244
6.2.2 反馈的判断	194	7.4.2 单片集成模拟乘法器	246
6.2.3 负反馈的四种类型	197	7.4.3 模拟乘法器的应用	248
6.3 负反馈放大电路的基本关系式	200	7.5 除法运算电路	250
6.3.1 方框图表示法	200	7.5.1 对数和指数电路组成的除法 运算电路	250
6.3.2 基本关系式	201	7.5.2 反函数型除法运算电路	250
6.4 负反馈对放大电路性能的 影响	203	7.6 集成运放实际应用中的 几个问题	251
6.4.1 提高放大倍数的稳定性	204	7.6.1 器件的选用	251
6.4.2 扩展通频带	205	7.6.2 自激振荡的消除	251
6.4.3 减小非线性失真	206	7.6.3 调零	252
6.4.4 抑制内部噪声和干扰	207	7.6.4 保护措施	252
6.4.5 对输入电阻和输出电阻的影响	207	7.6.5 单电源供电时的偏置问题	253
6.5 负反馈的正确引入	211	本章小结	254
6.5.1 引入原则	211	自测题	254
6.5.2 举例	212	习题	257
6.6 负反馈放大电路的分析计算	213	第8章 信号检测与处理电路	261
6.6.1 估算的依据	214	*8.1 信号检测系统中的放大 电路	261
6.6.2 深度负反馈放大电路的近似 计算	214	8.1.1 精密仪用放大器	261
6.7 负反馈放大电路的自激振荡	218	8.1.2 电荷放大器	264
6.7.1 负反馈放大电路的自激振荡及 稳定工作条件	218	8.1.3 采样保持电路	264
6.7.2 负反馈放大电路的稳定裕度	220	8.1.4 精密整流电路	266
6.7.3 常用消除自激的方法	220	8.2 有源滤波电路	267
本章小结	223	8.2.1 滤波电路的基础知识	267
自测题	224	8.2.2 低通滤波器	268
习题	225	8.2.3 高通滤波器	272
第7章 集成运放组成的运算电路	230	8.2.4 带通、带阻及全通滤波器	274
7.1 概述	230	*8.2.5 开关电容滤波器	278
7.1.1 线性应用及其特点	230	8.2.6 无限增益的有源滤波电路	279
7.1.2 非线性应用及其特点	231	8.2.7 集成有源滤波器	280
7.2 基本运算电路	232	8.3 电压比较器	282
7.2.1 比例运算电路	232	8.3.1 概述	282
7.2.2 加法运算电路和减法运算电路	236	8.3.2 单阈值电压比较器	283
7.2.3 反相输入运算电路的一般规律	237	8.3.3 滞回比较器	286
7.2.4 积分和微分运算电路	238	8.3.4 窗口比较器	289

8.3.5 单片集成电压比较器	290	10.3.1 LM386 集成功率放大器	352
本章小结	290	10.3.2 其他集成功率放大器	354
自测题	291	10.4 功率管的散热与二次击穿	356
习题	293	10.4.1 功率管的散热	356
第9章 波形发生电路	296	10.4.2 功率管的二次击穿	358
9.1 概述	296	本章小结	359
9.2 正弦波振荡电路	297	自测题	359
9.2.1 正弦波振荡电路的基本工作		习题	361
原理	297	第11章 直流电源	364
9.2.2 RC 正弦波振荡电路	299	11.1 概述	364
9.2.3 LC 正弦波振荡电路	303	11.2 整流电路	365
9.2.4 石英晶体振荡电路	314	11.2.1 基本概念	365
9.3 非正弦波发生电路	317	11.2.2 单相半波整流电路	365
9.3.1 非正弦波发生电路的基本概念	317	11.2.3 单相桥式整流电路	367
9.3.2 矩形波发生电路	318	11.2.4 倍压整流电路	371
9.3.3 三角波发生电路	320	11.3 滤波电路	372
9.3.4 锯齿波发生电路	322	11.3.1 电容滤波电路	372
9.3.5 集成函数发生器	323	11.3.2 其他滤波电路	375
本章小结	326	11.4 稳压电路	377
自测题	327	11.4.1 稳压电路的性能参数	377
习题	328	11.4.2 稳压管稳压电路	378
第10章 功率放大电路	333	11.4.3 串联型稳压电路	381
10.1 功率放大电路的特殊问题及其分类	333	11.5 三端稳压电路	386
10.1.1 功率放大电路的特殊问题	333	11.5.1 固定式三端稳压器	387
10.1.2 功率放大电路的分类	335	11.5.2 可调式三端稳压器	393
10.2 互补对称功率放大电路	336	*11.6 开关型稳压电路	395
10.2.1 互补对称功率放大电路的引出	336	11.6.1 串联式开关型稳压电路	396
10.2.2 乙类互补对称功率放大电路	339	11.6.2 并联式开关型稳压电路	399
10.2.3 甲乙类互补对称功率放大电路	347	本章小结	400
10.2.4 OCL 准互补对称功率放大电路	350	自测题	401
10.3 集成功率放大器	351	习题	403
		参考文献	406

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变得很强。利用这种特性,半导体可以被做成各种光敏器件,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,半导体可以被做成各种热敏元件。

(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四个电子。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。

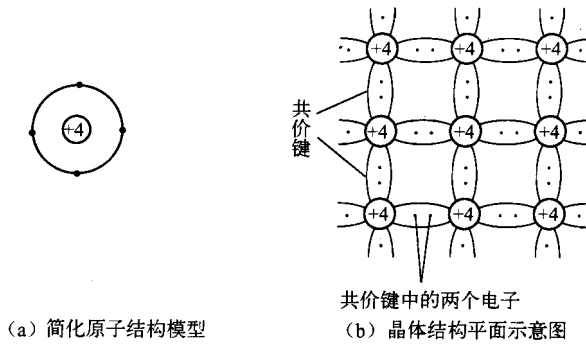


图 1-1 硅和锗的简化原子结构模型和晶体结构

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)原子最外层的四个价电子与相邻的四个硅(锗)原子的各一个价电子形成四对共价键结构。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八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。

(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。

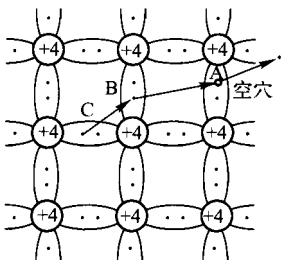


图 1-2 电子和空穴的移动

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五个价电子,则晶点阵中的某些位置上,杂质原子取代硅(锗)原子,有四个价电子与相邻的硅(锗)原子的四个价电子组成共价键,多余的一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。

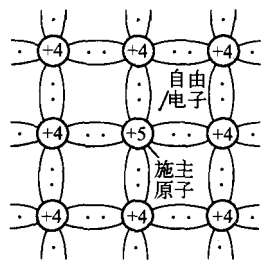


图 1-3 N 型半导体

(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

(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三个价电子,在与周围硅(锗)原子组成共价键时,因缺少一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

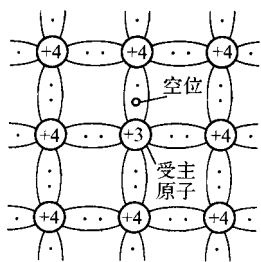


图 1-4 P 型半导体

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—块本征半导体上,通过一定的工艺使其—边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,那么在 P 型区和 N 型区的交界处就会形成一个极薄的空间电荷层,称为 PN 结。PN 结是构成其他半导体器件的基础。

(1) **扩散运动建立了空间电荷区和内电场** 如果半导体内载流子浓度分布不均匀,这时载流子便会从浓度高的区域向浓度低的区域运动。这种由于浓度差而引起的定向运动称为扩散运动,由载流子扩散运动形成的电流叫做扩散电流。当 P 型半导体和 N 型半导体结合到一起时,在它们的交界面,两种载流子存在很大的浓度差。P 区空穴的浓度远高于 N 区空穴的浓度,而 N 型半导体电子的浓度又远大于 P 型半导体电子的浓度。这种浓度差使 P 区的多子空穴向 N 区扩散,与 N 区的电子复合,在 P 区—侧留下不能移动的负离子薄层;而 N 区的多子电子向 P 区扩散,与 P 区的空穴复合,在 N 区—侧留下不能移动的正离子薄层,如图 1-5(a)所示。交界面两侧的这些不能移动的带电离子薄层通常称为空间电荷区。扩散作用越强,空间电荷区就越宽。

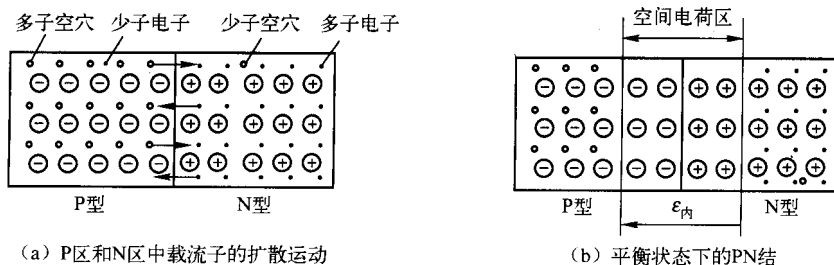


图 1-5 PN 结的形成

在空间电荷区中,—侧带正电,另一侧带负电。由于正、负电荷相互作用,在空间电荷区中形成一个电场,称为内电场,用 $\epsilon_{内}$ 表示。随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽,内电场增

强,其方向由带正电的 N 区指向带负电的 P 区。

(2) **内电场阻止多子扩散,促使少子漂移** 多子的扩散形成内电场,这个内电场的方向与多子扩散的方向相反,因此它阻碍多子扩散运动的进行。另一方面,在内电场的作用下,P 区和 N 区的少数载流子将做定向运动,这种运动称为漂移运动,由此引起的电流叫做漂移电流。P 区的少子自由电子向 N 区漂移,从而补充了原来交界面上 N 区所失去的电子,使正离子减少;而 N 区的少子空穴向 P 区漂移,从而补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴,使负离子减少。因此,漂移运动的结果是使空间电荷区变窄,内电场减弱,其作用正好与扩散运动相反。

(3) **PN 结形成** 由此可见,扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的,多子的扩散使空间电荷区加宽,内电场增强,而内电场的建立和增强又阻止多子扩散,促使少子漂移;少子漂移又使空间电荷区变窄,内电场减弱,从而使扩散容易进行。当漂移运动与扩散运动达到动态平衡时,通过空间电荷区的净电流为零。这时,空间电荷区的宽度和内电场的强度不再变化,至此,PN 结形成,如图 1-5(b)所示。

由于内电场的作用是阻止多子扩散,故又称空间电荷区为阻挡层;因为空间电荷区内几乎没有载流子,故又称其为耗尽层。

PN 结的内电场 $\varepsilon_{内}$ 所建立的电位差 U_{ho} ,是不同性质半导体的“接触电位差”,其大小与半导体材料、掺杂浓度及环境温度有关。在常温下,硅材料的 $U_{ho} \approx 0.6 \sim 0.8 \text{ V}$,锗材料的 $U_{ho} \approx 0.1 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

如果 P 区和 N 区的掺杂浓度相同,则两个区域里空间电荷区的宽度相同,称为对称 PN 结。如果两个区域的掺杂浓度不同,则掺杂浓度高的一侧离子密度大,空间电荷区较窄。相反,掺杂浓度低的一侧离子密度小,空间电荷区较宽,形成不对称 PN 结。若 P 区掺杂浓度高,记为 P^+N 。上述两种结的外部特性是相同的。

2. PN 结的单向导电性

上面讨论的 PN 结处于平衡状态,扩散电流等于漂移电流,通过空间电荷区的净电流为零。如果在 PN 结两端外加电压,将打破原来的平衡状态,扩散电流不再等于漂移电流,PN 结将有电流流过。电流的大小与外加电压的极性有关,即 PN 结呈现出单向导电性。

(1) **PN 结外加正向电压** PN 结外加正向电压是指:外加电源的正极接到 PN 结的 P 端,负极接到 PN 结的 N 端,也称做正向接法或正向偏置,简称“PN 结正偏”,如图 1-6(a)所示。此时,外加电场与 PN 结内电场方向相反。在外加电场的作用下,PN 结的平衡状态被打破,P 区的多子空穴向 N 区移动,与空间电荷区的负离子中和。同时,N 区的多子自由电子向 P 区移动,与空间电荷区的正离子中和。这样,使空间电荷数目减少,空间电荷区变窄,内电场减弱。这致使扩散运动加剧,漂移运动减弱,从而使扩散电流大于漂移电流。PN 结内的电流由起支配作用的扩散电流决定,在外电路上形成一个流入 P 区的电流,称为正向电流 I_F 。当外加正向电压增大时,内电场进一步减弱,扩散电流随之增加,形成较大的 PN 结正向电流。

在正常工作范围内,导通时的 PN 结压降只有零点几伏。因此,不大的正向电压可以产生相当大的正向电流。而且,外加正向电压的微小变化便能引起正向电流的显著变化。由此,正偏的 PN 结表现为一个很小的电阻。

(2) **PN 结外加反向电压** PN 结外加反向电压是指:外加电源的正极接到 PN 结的 N 端,负极接到 PN 结的 P 端,也称做反向接法或反向偏置,简称“PN 结反偏”,如图 1-6(b)所示。此时,外加电场与 PN 结内电场方向相同,这将促使 P 区的多子空穴和 N 区的多子自由电子背离 PN 结运动,使空间电荷数目增多,空间电荷区变宽,内电场增强。这就使多子的扩散运动减弱,少子的漂移运动增强并占优势。流过 PN 结内的电流主要由少子的漂移电流决定。这

一漂移电流的方向与扩散电流方向相反,表现在外电路上为流入 N 区的电流,称为反向电流 I_R 。由于少子是由本征激发产生的,浓度很小,因此 PN 结的反向电流远小于正向电流。在一定温度下,少子的浓度基本不变,PN 结反向电流几乎与外加反向电压的大小无关,这时的反向电流 I_R 称为反向饱和电流,用 I_S 表示。当温度变化时,少子的浓度也要变化,因而 PN 结的反向电流同样随之变化。

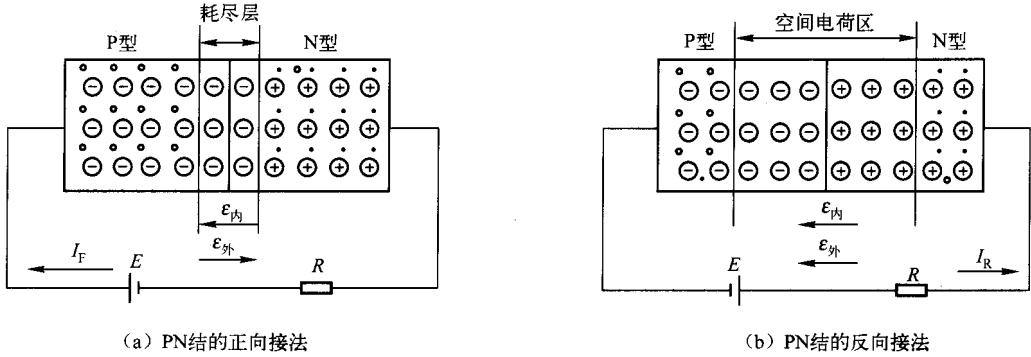


图 1-6 PN 结的单向导电性

由于 PN 结的反向电流很小,所以 PN 结在反向偏置时,可认为基本上是截止的,表现为一个很大的电阻。

由此可见,PN 结具有单向导电性。外加正向电压时,电阻很小,正向电流是多子的扩散电流,数值很大,PN 结导通;外加反向电压时,电阻很大,反向电流是少子的漂移电流,数值很小,PN 结几乎截止。

3. PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性是指 PN 结两端的外加电压 U 与流过 PN 结的电流 I 之间的关系曲线。

根据理论分析,PN 结的伏安特性可由下式表示:

$$I = I_S (e^{U/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, U 的参考方向为 P 区正,N 区负, I 的参考方向为从 P 区指向 N 区; I_S 在数值上等于反向饱和电流; $U_T = kT/q$,为温度电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电荷量。在常温下, $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

由式(1-1)可画出 PN 结的伏安特性,如图 1-7(a) 所示。

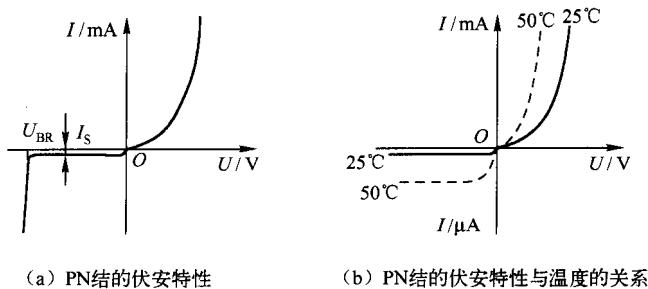


图 1-7 PN 结的伏安特性及温度对伏安特性的影响

(1) 正向特性 其中 $U > 0$ 的部分称为正向特性。当 PN 结外加正向电压,且 $U \gg U_T$ 时, $e^{U/U_T} \gg 1$,于是 $I \approx I_S e^{U/U_T}$ 。即在 U 大于一定值后,PN 结的正向电流 I 随正向电压 U 按指数规律变化。

(2) **反向特性** $U < 0$ 的部分称为反向特性。当 PN 结外加反向电压,且 $|U| \gg U_T$ 时, $e^{U/U_T} \ll 1$, 于是 $I \approx -I_S$ 。即反向电压达到一定值后,PN 结只流过很小的反向饱和电流,反向电流与反向电压的大小基本无关。

由式(1-1)可知,流过 PN 结的电流 I 与反向饱和电流 I_S 及温度电压当量 U_T 有关,而 I_S 和 U_T 都是温度的相关函数。因此,PN 结的伏安特性与温度也有密切关系。反向饱和电流 I_S 的数值取决于平衡状态下少子的数量。当温度升高时,半导体中本征激发增强,少子数量增多,故反向饱和电流 I_S 数值增大。另外,相对于产生同样大小的正向电流,正向压降随温度升高而减小。研究表明,保持正向电流不变时,环境温度每升高 1°C ,PN 结的正向压降约减小 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$ 。PN 结的伏安特性与温度的关系如图 1-7(b)所示。

(3) **PN 结的击穿特性** 当加到 PN 结上的反向电压超过一定数值后,反向电流急剧增加,这种现象称为 PN 结反向击穿,如图 1-7(a)所示。发生反向击穿所需的反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。按机理击穿分为齐纳击穿和雪崩击穿两种情况。

① **齐纳击穿** 在掺杂浓度较高的情况下,空间电荷区很薄,不大的反向电压就可在耗尽层形成很强的电场。强电场的作用足以把电子从共价键中拉出来形成大量的电子空穴对,致使反向电流急剧增大,这种击穿称为齐纳击穿。

② **雪崩击穿** 如果掺杂浓度较低,空间电荷区较宽,那么低的反向电压不会产生齐纳击穿。随着 PN 结反向电压的逐渐增加,空间电荷区的电场也逐渐增强,这使得漂移过空间电荷区的少数载流子获得足够大的动能,它们能把共价键中的价电子撞出来,产生新的电子空穴对。新的载流子又被电场加速,再去碰撞其他离子,产生新的电子空穴对。形成连锁反应造成载流子倍增,反向电流迅速增大,这种击穿称为雪崩击穿。

对于上述两种击穿,只要 PN 结不因电流过大导致过热而损坏,当外加反向电压降低到低于击穿电压时,PN 结的性能都能恢复到击穿前的情况,这种击穿现象称为电击穿。电击穿过程是可逆的。此外,当反向电流过大时,消耗在 PN 结上的功率较大,引起 PN 结温度升高,直到 PN 结过热而造成永久性损坏的击穿,称为热击穿。热击穿是不可逆的,因此要避免热击穿的发生。

4. PN 结的电容效应

在一定条件下,PN 结具有电容效应,按产生的原因不同,分为势垒电容和扩散电容。

(1) **势垒电容** 当 PN 结上外加电压的极性和大小发生变化时,空间电荷区里存储的空间电荷量随之变化,空间电荷区的宽度也随之变化。这种现象与电容的充、放电过程相似,而 PN 结的这种电容效应称为势垒电容。在 PN 结加正向电压时,多子进入 PN 结,中和了部分空间电荷,使空间电荷区变窄,等效于 P 区和 N 区的多子充入了 PN 结。当 PN 结正向电压减小或加反向电压时,多子远离 PN 结,空间电荷区变宽,相当于多子从 PN 结放出。PN 结的势垒电容用 C_B 表示。 C_B 是非线性电容,它的大小与 PN 结的结面积成正比,而与空间电荷区的宽度成反比。一般情况下, C_B 为几皮法(10^{-12} 法)至一二百皮法。在现代电子设备中,常利用 C_B 随反向电压而变化的特性制成各种变容二极管。

(2) **扩散电容** 当 PN 结外加正向电压时,N 区的多子电子扩散到 P 区后称为 P 区的非平衡少子。它们逐渐与 P 区的空穴复合,在 P 区形成浓度梯度,靠近空间电荷区交界面的地方浓度高,远离交界面的地方浓度低。同理,P 区的多子空穴也会向 N 区扩散成为 N 区的非平衡少子,在 N 区形成浓度梯度,如图 1-8 中的曲线①所示。当正向电压增大时,扩散到 P 区的电子和扩散到 N 区的空穴数量增加,扩散区内积累的非平衡少子电荷量增加,浓度分布曲线上移,如图 1-8 中的曲线②所示。当正向电压减小时,扩散区积累的非平衡少子电荷量减少,浓度分布曲线下移,如图 1-8 中的曲线③所示。扩散区内,电荷的积累和释放过程与电容