



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术 简明教程

■ 张国平 曾高荣 主编 ■ 刘 萌 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]

电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术简明教程

张国平 曾高荣 主 编

刘 萌 副主编



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书按照教育部本科生“模拟电子技术”的课程要求编写而成。全书系统地介绍了模拟电子电路的基础知识,并着重讲述了模拟电子技术的基本原理和基本分析方法,内容包括:半导体材料及常用半导体器件,基本放大电路,放大电路的频率响应,模拟集成单元电路,功率放大电路,放大电路中的负反馈技术,集成运放组成的运算电路,信号处理与波形发生电路,直流稳压电源。本书的主要特点是从模拟电子技术与后续课程的知识点衔接出发,承上启下,把二极管、晶体管、理想运算放大器等知识贯穿在相应的章节中,对相应模块单元电路提供了相应的设计实例,并在复习题中提供了相应的练习,为后续专业课打下扎实的理论基础。

本书可作为高等院校电子信息、电气工程、自动控制、通信工程、计算机科学与技术等专业的本科生教材,也可作为成人教育的教材和相关专业科技人员的参考书。

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

模拟电子技术简明教程 / 张国平, 曾高荣主编. —北京: 电子工业出版社, 2013.7

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-20521-7

I. ①模… II. ①张… ②曾… 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(2013)第 110627 号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 桑 昀

印 刷: 北京丰源印刷厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 19 字数: 502 千字

印 次: 2013 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 39.00 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 zltz@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

“模拟电子技术”课程是电子信息类专业、自动化控制等工科专业基础课程。本书按照教育部本科生“模拟电子技术”的课程要求编写而成，以培养应用型人才为目的，以应用、实用为原则，适应知识更新和课程体系改革需要，既便于教师参考又便于学生自学。

本书内容由浅入深，将知识点与能力有机结合，在内容编排上力求做到简明扼要、思路清晰和叙述详尽，同时注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。全书主要内容包括：半导体材料及常用半导体器件，基本放大电路，放大电路的频率响应，模拟集成单元电路，功率放大电路，放大电路中的负反馈技术，集成运放组成的运算电路，信号处理与波形发生电路，直流稳压电源。

在保证教材结构体系完整的前提下，本书注重基本概念、基本方法和基本原理简明扼要的叙述，并从模拟电子技术与后续课程的知识衔接出发，承上启下，把二极管、晶体管等效电路、理想运算放大器、直流电源等知识贯穿在相应的章节中。书中对基础理论和基本分析方法以及各种应用实例的详细讲解，做到有层次性，以期对读者进一步熟悉模拟电子电路的分析方法和设计方法有所帮助，并在复习题中提供了相应的练习，为后续专业课打下扎实的理论基础。

本书由张国平、曾高荣任主编，刘萌任副主编。全书共分9章，张国平编写第1、2、6、9章并负责全书统稿，刘萌编写第3、5章，曾高荣编写第4、7、8章。唐衍彬和朱小明参与了本书习题的选编和部分文字的录入工作。

江西师范大学模拟电子技术课程是学校优质建设课程，是江西师范大学电气类专业平台课程体系中的基础核心课程，面向电子信息与通信工程专业学生和其他院系部分学生开设。模拟电子技术课程的教学改革主要是要实现理论和工程应用并重，以模拟电路分析和设计为任务导向，着重培养学生的工程意识。非常感谢江西师范大学物理与通信电子学院对课程建设的大力支持。在本书的编写和出版过程中，嵇英华教授提出了不少宝贵意见。感谢马善钧教授和嵇英华教授对本书出版的大力支持。

衷心感谢电子工业出版社多位编辑为本书出版付出的辛勤劳动。

限于编者水平，本书难免有错误或不完善之处，恳请广大读者予以批评指正。

编 者

2013年5月

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，我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 半导体材料及常用半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	2
1.2 PN 结	3
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	5
1.2.3 PN 结的结电容	6
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 二极管的基本结构	8
1.3.2 二极管伏安特性	8
1.3.3 二极管的主要参数	9
1.3.4 半导体二极管的等效模型	11
1.3.5 稳压二极管	11
1.3.6 其他特殊二极管	13
1.4 晶体管	14
1.4.1 晶体管的结构及类型	15
1.4.2 晶体管的工作原理	15
1.4.3 晶体管的特性曲线	18
1.4.4 晶体管的主要参数	20
1.4.5 温度对晶体管特性及参数的影响	22
1.4.6 晶体管的交流小信号模型	22
1.5 场效应管	24
1.5.1 结型场效应管	25
1.5.2 绝缘栅场效应管	28
1.5.3 场效应管与晶体管的类比	32
1.6 常用半导体器件的应用与电路设计	33
本章总结	34
复习题	35
习题一	36
第 2 章 基本放大电路	42
2.1 放大电路的组成和分析方法	42

2.1.1	放大电路的基本概念	42
2.1.2	阻容耦合共发射极放大电路的组成	42
2.1.3	放大器的主要性能指标	44
2.1.4	放大电路的基本分析方法	46
2.1.5	放大电路静态工作点的稳定	54
2.2	三种基本组态放大电路交流特性的分析	56
2.2.1	共集电极放大电路	56
2.2.2	共基极放大电路	58
2.2.3	三种基本放大电路性能比较	59
2.3	多级放大电路	59
2.3.1	放大电路的级间耦合方式	60
2.3.2	多级放大电路的分析	61
2.3.3	晶体管组合电路	63
2.4	场效应管基本放大电路	64
2.4.1	共源极放大电路	64
2.4.2	共漏极放大电路	67
2.5	基本放大电路的应用与设计	68
2.5.1	基本单元放大器电路应用的一般原则	68
2.5.2	高输入阻抗 AC 缓冲放大器电路的设计	69
	本章总结	70
	复习题	71
	习题二	74
第 3 章	放大电路的频率响应	81
3.1	频率响应的一般概念	81
3.1.1	幅频特性和相频特性	81
3.1.2	下限频率、上限频率和通频带	81
3.1.3	频率失真	82
3.1.4	波特图	82
3.1.5	放大电路频率响应的分析方法	83
3.2	晶体管的高频等效模型	85
3.2.1	模型的引出	86
3.2.2	简化的混合 π 模型	87
3.2.3	晶体管电流放大倍数的频率响应	88
3.3	晶体管放大电路的频率响应	88
3.3.1	中频电压放大倍数	89
3.3.2	低频电压放大倍数	89
3.3.3	高频电压放大倍数	91
3.3.4	波特图	92
3.3.5	放大电路频率响应的改善和带宽增益积	93

3.4 多级放大电路的频率响应	94
3.4.1 多级放大电路的幅频特性和相频特性	95
3.4.2 多级放大电路截止频率的估算	95
本章总结	98
复习题	98
习题三	99
第4章 模拟集成单元电路	104
4.1 集成运算放大电路的特点	104
4.1.1 集成运算放大电路的特点及组成	104
4.1.2 集成运放的电压传输特性	105
4.2 集成电流源	106
4.2.1 三极管基本电流源	106
4.2.2 镜像电流源	107
4.2.3 多路输出比例电流源	108
4.3 有源负载电路	109
4.4 差分放大器	110
4.4.1 差分放大电路概述	110
4.4.2 基本差分放大电路的工作原理及性能分析	111
4.4.3 具有恒流源的差分放大电路	118
4.4.4 MOSFET 差分放大器	119
4.4.5 差分放大器的频率响应	120
本章总结	120
复习题	120
习题四	122
第5章 功率放大电路	126
5.1 功率放大电路概述	126
5.1.1 功率放大电路的特点	126
5.1.2 功率放大电路的分类	127
5.2 互补功率放大电路	128
5.2.1 双电源乙类互补功率放大电路	128
5.2.2 双电源甲乙类互补功率放大电路	128
5.2.3 采用复合管组成的准互补功率放大电路	129
5.2.4 单电源准互补功率放大电路	132
5.2.5 单电源供电桥式推挽功率放大电路	133
5.3 集成功率放大电路	134
5.3.1 LM386 内部电路	134
5.3.2 LM386 典型应用	135
5.4 功率放大电路设计	136
5.4.1 简易 LM386 功率放大器的设计任务与要求	136
5.4.2 设计任务分析	136

5.4.3 任务设计与实现	137
本章总结	137
复习题	138
习题五	139
第6章 放大电路中的负反馈技术	144
6.1 反馈的概念及反馈类型的判别方法	144
6.1.1 反馈的基本概念	144
6.1.2 反馈的形式及其判别	145
6.2 负反馈放大电路四种基本类型及放大倍数一般表达式	147
6.2.1 负反馈放大电路四种基本类型	147
6.2.2 负反馈放大电路放大倍数一般表达式	152
6.2.3 四种反馈类型的放大器电路特性总结	153
6.3 负反馈对放大器性能的影响	154
6.3.1 提高放大倍数的稳定性	154
6.3.2 展宽通频带	155
6.3.3 减小非线性失真和抑制干扰噪声	156
6.3.4 改变输入电阻	157
6.3.5 改变输出电阻	158
6.3.6 引入负反馈的一般原则	159
6.4 深度负反馈放大电路	160
6.4.1 深度负反馈的实质	160
6.4.2 深度负反馈放大电路的分析	161
6.4.3 负反馈放大电路的自激振荡简介	163
6.5 集成运放电压放大器电路的设计	166
6.5.1 设计任务	166
6.5.2 设计任务分析	167
6.5.3 任务设计与实现	167
本章总结	168
复习题	169
习题六	171
第7章 集成运放组成的运算电路	176
7.1 集成运放电路应用基础	176
7.1.1 理想集成运放模型与理想特性	176
7.1.2 理想运放工作在不同区域的条件及其特点	177
7.2 集成运放的线性应用	178
7.2.1 比例运算电路	178
7.2.2 加、减法运算电路	179
7.2.3 积分运算和微分运算电路	183
7.2.4 对数运算和指数运算电路	186
7.3 模拟乘法器及其在运算电路中的运用	188

7.3.1 变跨导型模拟乘法器	188
7.3.2 模拟乘法器在运算电路中的应用	190
7.4 运算电路中的模拟电路设计举例	191
本章总结	192
复习题	193
习题七	194
第 8 章 信号处理与波形发生电路	199
8.1 有源滤波电路	199
8.1.1 滤波电路基础知识	199
8.1.2 有源滤波器的分析方法	201
8.1.3 有源低通滤波电路	202
8.1.4 其他有源滤波电路	206
8.1.5 开关电容滤波电路	208
8.2 电压比较器	210
8.2.1 概述	210
8.2.2 单限比较器	211
8.2.3 迟滞比较器（正反馈比较器）	212
8.2.4 双限比较器（窗口比较器）	215
8.2.5 集成电压比较器	216
8.3 振荡器	218
8.3.1 产生正弦波振荡的条件	218
8.3.2 RC 正弦波振荡电路	220
8.3.3 LC 正弦波振荡电路	222
8.3.4 石英晶体振荡器	224
8.4 非正弦波发生电路	227
8.4.1 矩形波发生电路	227
8.4.2 三角波和锯齿波发生电路	229
8.4.3 阶梯波发生器	231
8.5 集成运算放大器的选择策略与应用技术	232
8.5.1 运放的选择策略	232
8.5.2 运放的分类与几种典型应用	232
本章总结	236
复习题	237
习题八	238
第 9 章 直流稳压电源	244
9.1 直流稳压电源概述	244
9.1.1 直流稳压电源的组成与分类	244
9.1.2 直流稳压电源的主要技术指标简介	245
9.2 整流滤波电路	245
9.2.1 半波整流电路	246

9.2.2	全波整流电路	247
9.2.3	桥式整流电路	249
9.2.4	电源滤波电路	250
9.2.5	倍压整流电路	254
9.3	二极管稳压电路	255
9.3.1	稳压电路的组成及稳压原理	255
9.3.2	稳压电路的主要性能参数	256
9.3.3	稳压电路设计时电路参数的选择	256
9.4	串联型反馈式稳压电路	258
9.4.1	串联型反馈式稳压电路的分析	258
9.4.2	串联型反馈式稳压电路的性能分析及提高性能的措施	259
9.5	集成稳压电路	262
9.5.1	三端集成稳压器的分类	262
9.5.2	三端固定输出集成稳压器的组成框图及其功能概述	263
9.5.3	三端固定输出集成稳压器的应用	265
9.5.4	三端可调集成稳压器及其应用	266
9.6	开关稳压电路	267
9.6.1	开关稳压电路的特点与分类	267
9.6.2	串联型开关稳压电路	268
9.6.3	并联型开关稳压电路	269
9.7	直流稳压电源的设计	270
9.7.1	单相直流稳压电源的设计任务与要求	270
9.7.2	设计任务分析	271
9.7.3	任务设计与实现	271
	本章总结	273
	复习题	274
	习题九	277
	部分习题参考答案	283
	参考文献	293

第 1 章 半导体材料及常用半导体器件

1.1 半导体基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

根据物质的导电性能可以将自然界的物质分为导体、半导体和绝缘体。自然界中很容易导电的物质称为导体，导体大多为低价元素，其最外层电子受原子核的束缚力很小，因此容易挣脱原子核的束缚成为自由电子。在外电场作用下，这些自由电子产生定向运动形成电流，呈现出良好的导电性能。金属一般都是良好的导体，如银、铜、铝和铁等金属。有的物质几乎不导电，称为绝缘体。这类物质的最外层电子受原子核的束缚力很强，通常无法摆脱原子核的束缚成为自由电子，其导电性很差，高价元素（如惰性气体）和高分子物质（如橡胶，塑料）都可作为良好的绝缘材料。另外还有一类物质的导电能力处于导体和绝缘体之间，称为半导体。

半导体的导电机理具有不同于其他物质的特点，它有三个很重要的特性，即热敏特性、光敏特性和掺杂特性。当半导体受到外界光或热的作用时，其导电能力发生显著变化，利用这一特性制成的光敏元件和热敏元件在实际工程中得到了广泛应用。纯净的半导体导电能力很差，如果掺入适量的某些杂质，其导电能力将明显增强，这称为掺杂特性。

1.1.2 本征半导体

纯净晶体结构的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料有硅和锗，它们的原子结构中最外层轨道上有四个价电子，是四价元素，其简化原子结构模型如图 1.1.1 所示。硅或锗材料形成单晶结构时，相邻原子的一对最外层电子（价电子）通过共价键结合成为共有电子，这对电子一方面围绕自身的原子核运动，另一方面还出现在相邻原子的轨道上。由于价电子不但受到自身原子核的作用，而且还受到相邻原子核的吸引，故形成了稳定的共价键结构，如图 1.1.2 所示每个原子都和相邻的 4 个原子通过共价键的形式互相紧密地结合起来了。

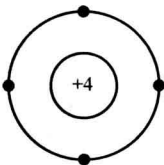


图 1.1.1 简化原子结构模型

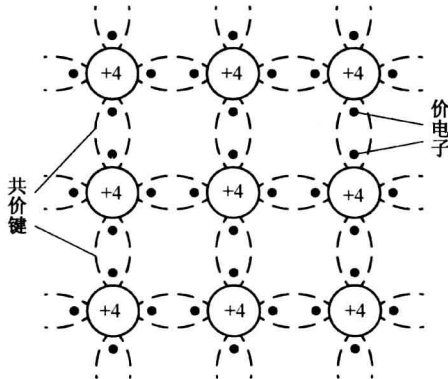


图 1.1.2 本征半导体共价键晶体结构

从本征半导体共价键晶体结构来看，共价键中的电子受到原子很强的束缚力。共价键中的某些价电子由于热运动有可能获得一定的能量，这些少量的电子就可能挣脱共价键的束缚而成为自由电子，同时在相应的共价键中留下空位，称为空穴。空穴和电子带等量的正电。半导体中有两种载流子参与导电，即带负电的自由电子和带正电的空穴。通常情况下，其载流子（自由电子和空穴）的数目很少，导电能力很差。在本征半导体中电子和空穴是成对产生的，在外加电场的作用下，自由电子和空穴都会定向移动。自由电子的定向移动形成电子电流，另外由于空穴的作用，价电子按照一定方向填补空位形成了空穴电流。因此，在半导体中，存在着两种载流子参与导电，即电子和空穴，由于两种载流子所带电荷的极性相反，运动方向相反，它们所形成的电流之和就是半导体中的总电流。

价电子在热运动中获得能量产生了电子-空穴对，通常把本征半导体在热和光的作用下产生电子-空穴对的现象称为本征激发。在本征激发过程中，自由电子在运动过程中失去能量，一旦与空穴相遇，使电子空穴对消失，这种现象称为复合。在一定温度下，载流子的激发过程和复合过程是相对平衡的，载流子的浓度虽然很少，但基本保持一定值。本征半导体中载流子的浓度，不但与半导体材料本身的性质有关，而且与温度有关。对于特定的半导体材料而言，本征载流子的浓度随着温度的升高，基本上呈指数规律增加。理论分析表明，本征半导体载流子的浓度为

$$n_i = p_i = AT^{3/2} e^{-E_g/(2kT)} \quad (1.1.1)$$

式中， n_i 和 p_i 分别为自由电子和空穴的浓度（即 1cm^3 晶体中载流子的数目）； A 表示和半导体材料有关的常数（硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$ ，锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$ ）； T 为热力学温度； E_g 为半导体激活能（即当热力学温度为 0K 时破坏共价键所需要的最低能量），也称为禁带宽度（当热力学温度 $T = 300\text{K}$ 时，硅的 $E_g = 1.1\text{eV}$ ，锗的 $E_g = 0.68\text{eV}$ ）； k 为玻耳兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。根据式（1.1.1）可以计算出，当热力学温度 $T = 300\text{K}$ 时，硅的本征半导体载流子的浓度为 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，锗的本征半导体载流子的浓度为 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。可以看出，当温度等于热力学温度 0K 时，本征半导体中虽然有大量的价电子，但载流子的浓度等于零，半导体不导电，相当于绝缘体。

通过上述分析可知，半导体载流子浓度对温度十分敏感。一方面可以利用此特性制成光敏元件和热敏元件，另一方面此特性也是造成半导体器件温度稳定性差的原因。

1.1.3 杂质半导体

利用半导体的掺杂特性可以制作不同类型的杂质半导体。半导体的掺杂一般在百万分之一左右，即使是重掺杂也不超过万分之一。所以掺杂并不改变原晶体结构，而仅仅是在晶体点阵的某些位置，半导体的原子被杂质原子所替代了。根据参入杂质的化合价的不同，杂质半导体可以分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中，掺入微量五价元素（如磷、锑、砷等），则原来晶格中的某些硅（锗）原子被杂质原子代替。由于五价元素杂质原子的最外层有五个价电子，它与周围 4 个硅（锗）原子组成共价键时还多余一个价电子。这个多余的价电子在共价键之外，不受共价键的束缚，而仅仅只受杂质原子核的束缚，因此即使在室温下，它也可以挣脱原子核的束缚而成为自由电子，杂质原子则成为带正电的杂质离子，带正电的杂质离子被束缚在晶体点阵中，不参与

导电，如图 1.1.3 所示。由于五价元素杂质原子可以提供电子，所以称为施主杂质，相应的离子称为施主离子。显然，由于掺杂所产生的自由电子浓度远远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度，这种半导体中的自由电子的浓度也远远大于空穴的浓度，自由电子被称为多数载流子（简称多子），空穴称为少数载流子（简称少子）。由于这种半导体主要靠电子导电，所以称为N型半导体或电子型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体中，掺入微量三价元素（如硼、铝、镓等），则原来晶格中的某些硅（锗）原子被杂质原子代替。由于五价元素杂质原子的最外层只有三个价电子，它与周围的硅（锗）原子组成共价键时因为缺少一个电子而产生一个空位。这个多余的空位在室温下就很容易吸引周围的硅原子的电子来填充，于是杂质原子成为带负电的离子，而附近提供电子的硅原子的共价键中因为提供一个电子而出现空穴。杂质原子成为带负电的杂质离子，带负电的杂质离子被束缚在晶体点阵中，不参与导电，如图 1.1.4 所示。由于三价元素杂质原子可以吸收电子，所以称为受主杂质，相应的离子称为受主离子。显然，由于掺杂所产生的空穴浓度远远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度，这种半导体中的空穴的浓度也远远大于自由电子的浓度，空穴被称为多数载流子，自由电子称为少数载流子。由于这种半导体主要靠空穴导电，所以称为 P 型半导体或空穴型半导体。

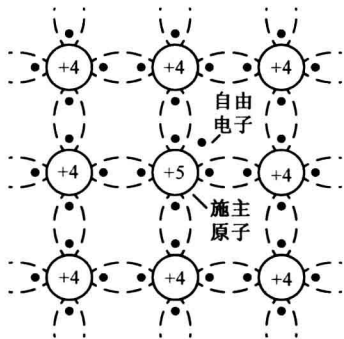


图 1.1.3 N 型半导体共价键结构

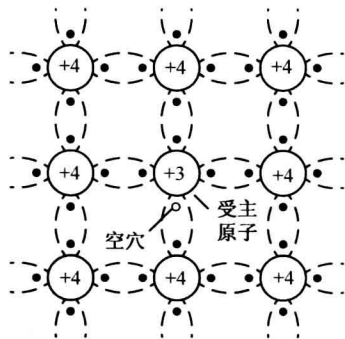


图 1.1.4 P 型半导体共价键结构

需要注意的是，杂质半导体（N 型半导体或 P 型半导体）虽然存在两种载流子（多子和少子）参与导电，但半导体整体显电中性。多数载流子的浓度主要取决于所掺杂质的浓度，少数载流子的浓度取决于本征激发（和光照和温度密切相关），温度是影响半导体器件性能的一个很重要的因素。当半导体中的同一区域中既有施主杂质又有受主杂质时，则半导体的类型取决于浓度大的杂质。因此，当 P 型半导体中掺入浓度更大的施主杂质时，将变为 N 型半导体，反之亦然。

1.2 PN 结

单纯的杂质半导体和本征半导体相比，仅仅是提高了导电性能，一般只能制作电阻器件，而无法制成半导体器件。如果采用一定的掺杂工艺，在一块本征半导体的两边分别掺入不同的杂质，则半导体的一边成为 N 型半导体，另一边就成为 P 型半导体了。由于两种杂质半导体的相互作用在其交界出形成了一个很薄（ μm 数量级）的特殊导电层，这就是 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

1.2.1 PN 结的形成

1. 多数载流子的扩散运动和空间电荷区的建立

当两种不同的杂质半导体结合在一起时, 由于在交界面附近 P 区和 N 区两侧载流子浓度的差异, P 区的空穴必然向 N 区扩散, 并和 N 区的电子相遇而复合消失; N 区的电子也必然向 P 区扩散, 并和 P 区的空穴相遇而复合消失。这种因浓度差异而引起载流子运动的现象称为扩散运动。载流子的扩散运动是定向运动, 会形成扩散电流, 如图 1.2.1(a)所示。

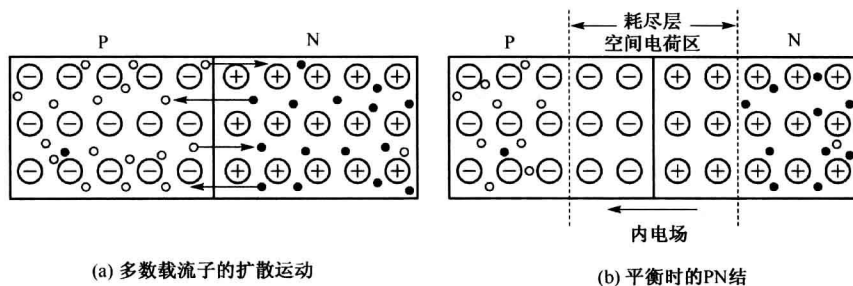


图 1.2.1 PN 结形成示意图

多数载流子扩散运动的结果是在交界面处, N 区的一侧出现了不能移动的正离子, 另一侧出现了不能移动的负离子, 如图 1.2.1(b)所示。这些不能移动的正负离子称为空间电荷, 由空间电荷组成的区域称为空间电荷区, 这就是 PN 结。

2. 内电场的建立及其作用

空间电荷区建立的同时产生了一个由 N 区指向 P 区的电场, 这个电场不是外加的, 为区别于外加电压而产生的电场, 称为内电场。在电场的作用下, 半导体中载流子的定向运动称为漂移运动, 相应形成漂移电流。内电场一方面阻止多子的扩散运动, 另一方面加速少子的漂移运动。可以想象, 当 PN 结没有外加电压, 在同一时间内扩散到空间电荷区的载流子数量和漂移出去的载流子数量相等时, 两种运动处于动态平衡, 此时, 流过 PN 结的扩散电流和漂移电流大小相等, 方向相反, 因此流过 PN 结的总电流等于零。由于 PN 结存在内电场, 则其两端有一定的电位差 U_h , 电位差 U_h 可以用公式 (1.1.2) 来计算:

$$U_h = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = U_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (1.2.1)$$

式中, N_D 和 N_A 分别为施主杂质和受主杂质的浓度 (一般 $N_D = 10^{17}$ 个/ cm^3 , $N_A = 10^{15}$ 个/ cm^3); T 为热力学温度; k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。 $U_T = \frac{kT}{q}$, 称为温度的电压当量 (或

者称为“热电压”), 可以计算出, 当热力学温度 $T = 300\text{K}$ 时, $U_T = \frac{kT}{q} \approx 26\text{mV}$ 。根据式 (1.1.2)

可以算出硅的内建电位差 $U_h \approx 0.6 \sim 0.8\text{V}$, 取 0.7V ; 锗的内建电位差 $U_h \approx 0.2 \sim 0.3\text{V}$, 取 0.2V 。由于 PN 结内建电场对多子的扩散运动起到阻挡作用, 所以空间电荷区又称为阻挡层或者势垒区, 在空间电荷区中多子都扩散到对方被复合了, 使得可以移动的正负电荷丧失殆尽, 因此也可以把空间电荷区称为耗尽层。

由于耗尽层中正负离子所带的电量相等，当 P 区和 N 区的掺杂浓度相等时，则交界面两侧的空间电荷区的宽度相等，这称为对称 PN 结。实际中大多数是不对称 PN 结，即杂质浓度高的一侧耗尽层的宽度小于杂质浓度低的一侧。下面讨论对称 PN 结，其结论同样适用于非对称 PN 结。

1.2.2 PN 结的单向导电性

在实际工作中，PN 结总是要外加一定的电压，这称为偏置。由于偏置电压的作用，PN 结的动态平衡将被破坏，载流子的运动情况发生了变化。

1. PN 结外加正向电压时的导通状态

若将电源的正极接 P 区，负极接 N 区，则称为正向接法或正向偏置。正向偏置时外加电压在阻挡层内形成的电场与内场方向相反，削弱了内电场，使空间电荷减少，阻挡层变窄，如图 1.2.2(a)所示。显然，这有利于多子的扩散作用，阻止少子的漂移运动，在电源作用下，多子向对方区域扩散形成的正向电流远远大于少子的漂移电流，PN 结中的电流由电源正极通过 P 区、N 区到达负极。此时 PN 结对外电路呈现较小的正向电阻，有较大的正向电流，这种状态称为 PN 结的正向导通状态。图 1.2.2(a)所示电路中电阻 R 起到限流作用，以保护 PN 结不被损坏。

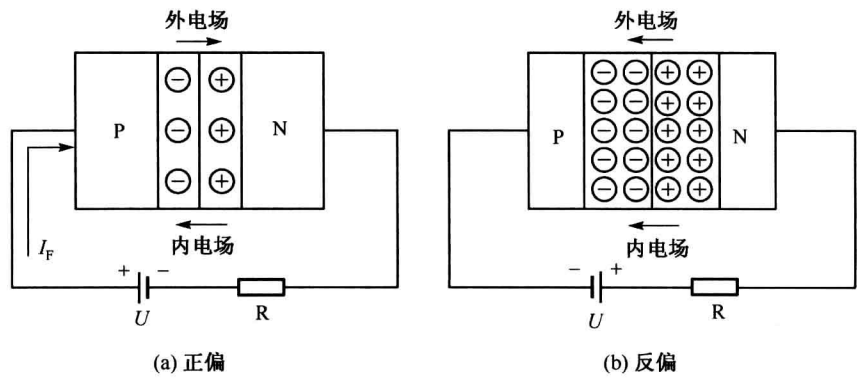


图 1.2.2 外加不同电压时的 PN 结

2. PN 结外加反向电压时的截止状态

若将电源的正极接 N 区，负极接 P 区，则称此为反向接法或反向偏置（简称反偏）。反偏时外电场与内电场方向相同，增强了内电场，使阻挡层变宽，如图 1.2.2(b)所示。此时少子的漂移作用大于多子的扩散作用，流过 PN 结的电流主要由少数载流子的漂移运动形成，由于其电流方向与正偏时相反（由 N 区流向 P 区），故称为反向电流。由于少数载流子的浓度（主要取决于温度）很低，故反向电流很小，而且当反偏电压超过零点几伏时，几乎所有的少子都参与导电形成漂移电流，此时即使再增加反向电压，反向电流也不会增加，故称为反向饱和电流，用 I_s 表示。 I_s 受温度影响很大，一般硅的 I_s 小于 $1\mu A$ ，锗的 I_s 大于 $10\mu A$ ，从这个意义上说，硅管的反向饱和电流远远小于锗管。

通过上述分析知道，PN 结正偏时，呈低阻导通状态，相当于开关的闭合；PN 结反偏时，呈高阻截止状态，相当于开关的断开。这就是 PN 结的单向导电性。

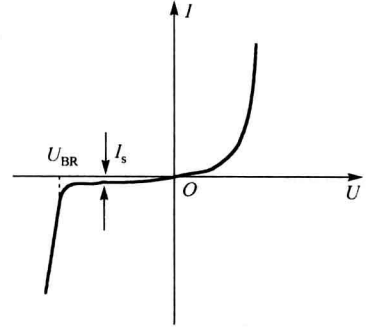
3. PN 结的单向导电性

PN 结的单向导电性可以通过 PN 结两端的伏安特性来描述, 根据理论分析, PN 结两端的伏安特性方程为

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1.2.2)$$

式中, I_s 为反向饱和电流; $U_T = kT/q$, 为温度的电压当量。

从式 (1.2.2) 中可以看出, 当 $U=0$ 时, $I=0$, PN 结没有电流流过; 当正偏电压 $U \gg U_T$ 时, $I \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}}$, 即电流和电压成指数关系; 当反偏电压 $|U| \gg U_T$ 时, $I \approx -I_s$, 即反向电流和反偏电压没有关系, 电流为一恒定值, 实际方向和参考方向相反。由此可以画出 PN 结两端的伏安特性曲线, 如图 1.2.3 所示。



4. PN 结的反向击穿

当 PN 结的反向电压增大到某数值 U_{BR} (U_{BR} 称为反向击穿电压) 时, 反向电流会突然急剧增大, 即电压在 U_{BR} 附近只要变化一点点, 电流就变化很多。这种由于反偏电压增大而引起的击穿称为电击穿, 电击穿是可逆的, 当电压恢复正常时, PN 结恢复正常。需要注意的是, 电击穿如不采取限流或散热等措施, 很有可能因为流过 PN 结的电流过大而发热烧毁 PN 结, 这种现象称为热击穿 (不可逆的)。

电击穿可以分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。在发生雪崩击穿的 PN 结中, 一般半导体的掺杂浓度比较低, 耗尽层比较宽, U_{BR} 较高。当反偏电压增加时, 空间电荷区的电场增加, 少子的漂移运动加强, 电子和原子间发生碰撞, 将中性粒子中的价电子拉出来形成新的电子空穴对, 新的电子空穴对在结区加速并再次发生碰撞, 再次产生新的电子空穴对, 形成了载流子倍增的连锁反应, 这种现象称为雪崩击穿。在发生齐纳击穿的 PN 结中, 一般半导体的掺杂浓度比较高, 耗尽层比较窄, U_{BR} 较低。当反偏电压升高时, 由于耗尽层比较窄, 不大的反偏电压就足以在耗尽层形成较强的外加电场, 较强的外加电场将强行把结区中的价电子从共价键中拉出来形成新的电子空穴对, 使反向电流急剧增大, 这种现象称为齐纳击穿。对于硅材料的 PN 结, U_{BR} 大于 7V 时通常发生雪崩击穿, U_{BR} 小于 4V 时通常发生齐纳击穿, U_{BR} 在 4~7V 之间时两种击穿都会发生。特殊类二极管 (如稳压管等) 通常发生齐纳击穿, 一般二极管的电击穿通常为雪崩击穿。

1.2.3 PN 结的结电容

从 PN 结的单向导电性分析可以看出, 当电压发生变化时, 空间电荷区的电荷也发生变化, 因此具有电容特性。PN 结的结电容从产生的机理上可以分为势垒电容 (用 C_B 表示) 和扩散电容 (用 C_D 表示) 两种。

1. 势垒电容 C_B

PN 结的势垒电容 C_B 是由空间电荷区形成的。当 PN 结正偏时, 空间电荷区变窄, 正负离子的电荷量减小, 好像有部分的电子-空穴对分别“存入”了耗尽层, 中和了部分的正负