

# 模拟电子技术

*MONI DIANZI JISHU*

MONI DIANZI JISHU

卜益民 主编



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

# 模拟电子技术

第2版

机械工业出版社

# 模拟电子技术

卜益民 主编

北京邮电大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书内容包括半导体二极管及其应用电路、晶体三极管及放大电路基础、场效应管及其放大电路、反馈放大电路、模拟集成电路、功率放大器、直流稳压电源、正弦波振荡电路、振幅调制与解调、角度调制与解调、反馈控制电路等章节。

本书的编写紧密结合通信等相关专业方向的教学要求,分高频和低频两大部分,在阐述上注意知识框架体系的连贯性,同时在内容分布上又基本相对独立。低频部分的介绍强调理论联系实际,突出集成电路;高频部分的介绍紧抓基础概念并密切联系通信的实际应用。

本书可作为工科通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术、电气自动化、机电一体化等相关专业的教材,也可供其他有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/卜益民主编. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 978-7-5635-0976-8

I. 模… II. 卜… 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(2004)第 129533 号

---

书 名: 模拟电子技术

主 编: 卜益民

责任编辑: 方 瑜

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编: 100876)

北方营销中心: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

南方营销中心: 电话: 010-62282902 传真: 010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17.25

字 数: 423 千字

印 数: 8 001—11 000 册

版 次: 2005 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 3 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-0976-8/TN · 352

定 价: 28.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

# 编 委 会

主 任：肖传统

副主任：张孝强 张干生 严潮斌

委 员：(以姓氏笔画为序)

王立平 王巧明 王晓军 王 颖 宁 帆

刘翠霞 李 飞 李文海 苏开荣 吴正书

李转年 迟学芬 吴瑞萍 张一鸣 张敏华

张献居 张新瑛 杨 泉 顾生华 孟祥真

徐淳宁 曹晓川 蒋青泉 傅德月

秘 书：王琴秋

# 前 言

《模拟电子技术》一书是高职及成人教育专业基础教材,适用于通信、计算机、信息、电子技术应用和自动化等电类各专业使用。

本书是由南京邮电大学、四川邮电职业技术学院、长沙通信职业技术学院、安徽邮电职业技术学院、河北邮电职业技术学院及黑龙江信息职业技术学院等六所院校的相关教师联合编写的配套教材。

随着高等教育教学改革的深入,现代电子技术的迅速发展,同时应对通信行业各高职及成人教育院校教材建设的需要,我们依据其教学要求,结合通信行业高职及成人教育的教学特点;认真总结各参编院校的教改经验,参考国内外诸多文献与著作,编写了本书。本书内容的选取在注重系统理论体系的完整性的同时,对其适当调整,立足基础,突出电子器件、电路方面的实际应用。基础理论的阐述力求做到概念准确、语言简明,特别结合当前高职及成人教育的教学层次,注重由浅入深,循序渐进。

本书在例题及习题的遴选上充分考虑其针对性、启发性和实用性,并充分体现本书的教学要求。

在编排上,对拓宽或加深的內容,均注有\*号。各专业可根据实际需要,依据教学大纲对本教材的章节内容进行适当的选择。

本书共分十一章,其中第1、2章由张效民编写;第5、11章由海德利编写;第3、4、6、7、8、9、10章由卜益民编写,海德利对本书部分章节做了较大修改,卜益民负责全书的统稿和定稿工作。

在本书编写过程中,南京邮电大学的李飞博士、张豫滇副教授、叶大振副教授提出了很多宝贵的指导性意见;安徽邮电职业技术学院的汪国俊院长、胡鹏副院长,长沙通信职业技术学院的肖传统院长、翁兴旺副院长等对本书的编写工作给予了许多支持和帮助;还有汪维红、王秋浦、马仕进、曹火枝、奚国新、余鹏飞等同志为本书的录入、整理做了不少工作,在此,一并表示衷心的感谢。

作 者

2004年12月

# 目 录

## 第 1 章 半导体元器件基础

1.1 半导体物理基础知识 .....	1
1.1.1 本征半导体 .....	1
1.1.2 杂质半导体 .....	2
1.1.3 漂移电流和扩散电流 .....	3
1.2 PN 结及其特性 .....	4
1.2.1 PN 结的形成 .....	4
1.2.2 PN 结的特性 .....	5
1.3 半导体二极管 .....	7
1.3.1 半导体二极管的结构、类型 .....	7
1.3.2 二极管的性能描述 .....	8
1.3.3 二极管等效电路 .....	11
1.3.4 二极管的应用电路 .....	12
1.3.5 特殊二极管 .....	14
1.4 双极型晶体管 .....	16
1.4.1 双极型晶体管的基本工作原理 .....	17
1.4.2 晶体三极管的特性曲线与部分极限参数 .....	19
习题 .....	23

## 第 2 章 放大器基础

2.1 放大器的工作原理 .....	27
2.1.1 放大器的直流偏置电路 .....	27
2.1.2 放大器图解分析法 .....	28
2.1.3 放大器等效电路分析法 .....	31
2.1.4 共集、共基放大电路分析 .....	34
2.1.5 三种基本组态特性的比较 .....	36

2.2 放大电路的级联	37
2.3 放大器的频率特性	40
2.3.1 频率失真	40
2.3.2 晶体管共射极混合 $\pi$ 型等效电路及频率特性分析	42
* 2.3.3 频率特性的改善	43
2.4 小信号选频放大器	44
2.4.1 通频带与选择性	44
2.4.2 单谐振回路与耦合回路	45
* 2.4.3 几种集中选频滤波器简介	50
习题	53

### 第3章 场效应管及其放大电路

3.1 结型场效应管	58
3.1.1 结型场效应管基本结构和类型	58
3.1.2 结型场效应管的基本工作管理	59
3.1.3 结型场效应管的特性曲线及其数学描述	61
3.2 绝缘栅场效应管	62
3.2.1 绝缘栅场效应管基本结构和类型	62
3.2.2 N 沟道增强型 MOSFET	63
3.2.3 其他类型的 MOSFET	65
* 3.2.4 VMOS 功率场效应管简介	66
3.3 场效应管的特点及主要参数	66
3.3.1 场效应管与晶体三极管的比较	66
3.3.2 场效应管的主要参数	67
3.4 场效应管基本放大电路	68
3.4.1 场效应管的偏置电路	68
3.4.2 场效应管的微变等效电路	70
3.4.3 场效应管的基本放大电路性能分析	70
习题	72

### 第4章 反馈放大电路

4.1 反馈的基本概念	76
4.1.1 反馈概念的引入	76
4.1.2 反馈放大器的基本框图和一般表达式	77
4.2 反馈放大电路的分析	79



4.2.1	反馈放大电路的基本类型及判别	79
4.2.2	反馈放大电路的分析举例	81
4.2.3	深负反馈放大电路的计算	84
4.3	负反馈对放大器性能的影响	84
* 4.4	反馈放大器稳定性讨论	87
4.4.1	负反馈放大器稳定工作的条件	87
4.4.2	判断放大器是否稳定的方法	88
4.4.3	消除自激振荡的方法	89
	习题	90

## 第5章 模拟集成电路

5.1	电流源	95
5.1.1	镜像电流源	95
5.1.2	比例电流源	96
5.1.3	微电流源	97
5.1.4	MOS 电流源	97
5.1.5	有源负载	98
5.2	差动放大器	99
5.2.1	零点漂移的概念	99
5.2.2	差动放大器的工作原理	100
5.3	集成运算放大器	103
5.3.1	集成运放电路的组成	104
5.3.2	集成运放的主要参数	104
5.3.3	集成运放的类型	105
5.4	集成运放的基本应用	107
5.4.1	理想集成运放	107
5.4.2	基本放大电路	107
5.4.3	线性运算电路	109
5.4.4	非线性运算电路	111
* 5.5	集成运放的其他应用	112
5.5.1	有源滤波器	112
5.5.2	精密二极管电路	120
5.5.3	比较器电路	121
5.5.4	取样-保持电路	123
5.5.5	信号产生电路	124

5.6 模拟乘法器及其应用 .....	128
5.6.1 模拟乘法器的基本概念 .....	128
5.6.2 二象限变跨导模拟乘法器 .....	129
* 5.6.3 四象限模拟乘法器 .....	130
5.6.4 模拟乘法的非线性运算电路 .....	132
* 5.7 回转器电路 .....	134
5.7.1 回转器基本概念 .....	134
5.7.2 等效接地电感 .....	134
5.7.3 等效浮地电感 .....	135
习题 .....	136

## 第6章 功率放大器

6.1 功率放大器的特点及分类 .....	138
6.1.1 功率放大器的特点 .....	138
6.1.2 功率放大器的分类 .....	140
6.2 低频功率放大器 .....	142
6.2.1 乙类互补对称功率放大器(OCL 电路) .....	142
6.2.2 交越失真及甲乙类互补对称功率放大电路 .....	145
6.2.3 单电源互补对称功率放大电路(OTL 电路) .....	146
* 6.2.4 单电源桥式互补对称功放 .....	147
6.2.5 准互补推挽功率放大电路 .....	148
6.3 集成功放 .....	149
6.4 高频丙类谐振功率放大器 .....	151
6.4.1 电路组成和工作原理 .....	151
6.4.2 丙类功放性能分析 .....	154
6.4.3 丙类放大器的工作状态 .....	156
* 6.4.4 常用丙类谐振功率放大电路 .....	157
习题 .....	159

## 第7章 直流稳压电源

7.1 直流稳压电源的组成 .....	163
7.2 整流电路 .....	164
7.2.1 半波整流电路 .....	164
7.2.2 全波整流电路 .....	165
7.2.3 桥式整流电路 .....	165

* 7.2.4 倍压整流电路 .....	166
7.3 滤波电路 .....	166
7.3.1 电容滤波电路 .....	166
7.3.2 其他形式的滤波电路 .....	169
7.4 稳压电源 .....	170
7.4.1 稳压电路的主要指标 .....	170
7.4.2 串联型直流稳压电路 .....	171
* 7.5 集成稳压电源 .....	173
7.5.1 集成稳压器的分类及内部结构 .....	173
7.5.2 三端固定输出电压集成稳压器 .....	174
7.6 开关型稳压电源 .....	176
7.6.1 开关型稳压电源的概述 .....	176
7.6.2 开关稳压电源的基本结构 .....	177
7.6.3 串联开关型稳压电路工作原理 .....	177
7.6.4 开关电源集成控制器及其应用分析 .....	179
习题 .....	181

## 第 8 章 正弦波振荡电路

8.1 正弦波振荡电路的基本原理 .....	186
8.1.1 振荡电路的概述 .....	186
8.1.2 振荡电路工作的三个条件 .....	187
8.2 LC 反馈型正弦波振荡电路 .....	190
8.2.1 电感分压反馈型正弦波振荡电路 .....	190
8.2.2 电容分压反馈型正弦波振荡器 .....	191
8.2.3 三种 LC 振荡电路特性比较分析 .....	192
8.3 石英晶体振荡电路 .....	193
8.3.1 频率稳定度及稳频措施 .....	193
8.3.2 三点式振荡电路的改进 .....	194
8.3.3 石英晶体振荡电路 .....	195
8.4 RC 正弦波振荡电路 .....	196
8.4.1 RC 选频电路性能回顾 .....	197
8.4.2 文氏电桥振荡电路 .....	197
习题 .....	199

## 第 9 章 振幅调制与解调

9.1 无线通信概述 .....	202
------------------	-----

9.1.1	无线通信与高频电子线路	202
9.1.2	无线通信系统	203
9.1.3	调制解调的基本概念	204
9.2	振幅调制	204
9.2.1	普通调幅(AM)波	204
9.2.2	双边带调幅(DSB)波	207
9.2.3	单边带调幅(SSB)波	208
9.3	振幅检波	209
9.3.1	包络检波器	210
9.3.2	乘积检波器	211
9.4	混频	211
	习题	212

## 第 10 章 角度调制与解调

10.1	角度调制	214
10.1.1	瞬时频率与瞬时相位的概念	214
10.1.2	调频波与调相波	215
10.1.3	调角波的频谱与带宽	219
10.2	角度调制电路	221
10.2.1	角度调制基本原理	221
10.2.2	变容二极管直接调频电路	222
* 10.2.3	变容二极管调相电路	225
* 10.2.4	变容二极管间接调频电路	226
10.3	调角波的解调	227
10.3.1	鉴频器的基本原理	227
10.3.2	单失谐回路斜率鉴频电路	227
10.3.3	双失谐回路斜率鉴频电路	228
10.3.4	鉴频器的主要性能指标	229
* 10.3.5	集成电路中应用的斜率鉴频器	230
	习题	232

## 第 11 章 反馈控制电路

11.1	自动振幅控制电路	234
11.2	自动频率控制电路	236
11.3	自动相位控制——锁相	237

---

11.3.1	锁相环的组成及工作过程·····	237
11.3.2	环路部件·····	238
11.3.3	锁相环的相位模型与环路基本方程·····	241
11.3.4	一阶环路的图解分析法·····	242
11.3.5	捕捉带与同步带·····	243
11.4	锁相环的应用·····	245
11.4.1	调频波锁相解调电路·····	245
11.4.2	调相波的锁相解调电路·····	246
11.4.3	普通调幅波的解调电路·····	246
* 11.4.4	抑制载波的双边带调幅信号解调电路 ·····	247
* 11.4.5	数字信号位同步提取电路 ·····	248
11.5	锁相频率合成器·····	249
11.5.1	基本数字频率合成器·····	249
* 11.5.2	下变频锁相环频率合成器 ·····	250
* 11.5.3	变模前置分频锁相频率合成器 ·····	252
	习题·····	253
<b>附录</b>	<b>本书常用符号一览表</b> ·····	<b>255</b>
<b>参考文献</b> ·····		<b>261</b>

本章首先介绍半导体的基础知识及半导体的导电机理,接着以 PN 结的形成作为起点,讨论半导体二极管的特性及主要参数,并对二极管的简单应用电路进行分析讨论。最后,阐述双极型晶体管的工作原理、特性曲线与主要参数。本章的学习应以了解基本概念,掌握管子的外特性为主要原则。

## 1.1 半导体物理基础知识

根据导电能力的不同,物质可分为导体、半导体和绝缘体三种。有些物质(如银、铜、铁等)很容易导电,称之为导体;另一些物质(如塑料、陶瓷、有机玻璃、橡胶等)几乎不导电,称之为绝缘体。而把导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,如硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等。

半导体在不同的条件下会呈现一些独特的导电特性,正是因为这些独特的导电特性,才使半导体得到广泛的应用。例如,若在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后,其导电能力就可能提高几十万乃至几百万倍,利用这种特性可以制造如二极管、三极管等各种晶体管器件;有些半导体对温度的反应很灵敏,其导电能力随温度的上升而明显增强,利用这种特性可以制造热敏电阻、温度传感器等各种热敏元件;还有一些半导体受到光照时,它们的导电能力变得很强,利用这种特性可以制造光敏电阻、光电管等各种光敏元件。

为什么半导体具有上述特性呢?这要从半导体的原子结构入手进行分析。

### 1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的、不含杂质的半导体。目前,用得最多的半导体材料是锗和硅,它们的原子结构如图 1.1 所示。锗和硅最外层电子数都是四个,所以称它们为四价元素。外层电子受原子核的束缚力最小,称为价电子。半导体的导电性能与价电子数有很大关系。

当硅(锗)材料制成纯单晶体时,它的原子排列就由杂乱无章变成了非常整齐有序的状态。由于原子间距离很近,原来隶属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响,使价电子为两个原子所共有,从而形成了

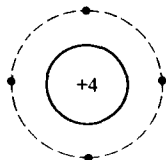


图 1.1 硅原子或锗原子简化图

晶体中的“共价键”结构。每个硅(锗)原子的四个价电子与相邻的四个原子的各一个价电子组成四对共价键,从而使每个硅(锗)原子最外层拥有八个电子。因此,本征硅和锗是稳定的。

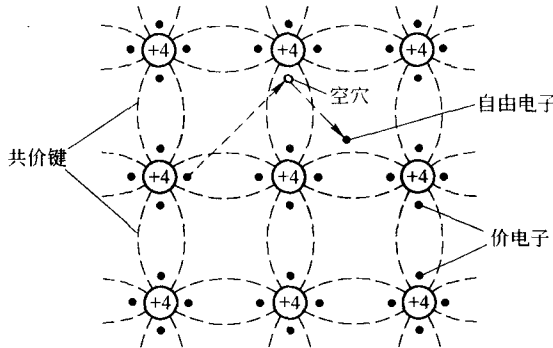


图 1.2 硅或锗材料的共价键结构

在绝对温度零度 ( $T = 0\text{ K}$ , 相当于  $-273^\circ\text{C}$ ), 同时又无外部激发时, 价电子无法挣脱共价键的束缚, 半导体中没有可以自由运动的带电粒子——载流子。因此, 即使有外电场作用也不能产生电流。此时的半导体相当于绝缘体。但是当有外部激发, 如温度升高或光照时, 就会使一些价电子获得能量, 挣脱共价键的束

缚, 成为自由电子, 这种现象称为本征激发。当价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后, 在共价键中就留下了一个空位, 这个空位称为空穴。而邻近共价键内的价电子就有可能跑过来填充, 在原来的位置产生新的空穴, 这种情况相当于空穴在移动, 空穴是因失去价电子形成的, 所以它是带正电的载流子。

由此可见, 本征半导体中存在两种载流子: 带负电的自由电子和带正电的空穴。它们是对称出现的, 所以也称为“电子空穴对”。由于两者电荷量相等, 极性相反, 所以, 本征半导体是电中性的。半导体在外电场作用下, 通过它的电流可以看作是由两部分组成: 一部分是自由电子逆电场方向定向运动形成的电子电流; 另一部分是共价键中价电子填补空穴形成的空穴电流, 即半导体中的电流为电子电流和空穴电流之和。

由热激发产生的自由电子也会释放能量返回到附近的空穴, 这一过程称为复合。在一定温度下, 电子空穴对的激发和复合将达到一个动态平衡状态, 此时半导体中电子空穴对将维持在一定的数目。

在常温下由热激发产生的电子-空穴对的数量是很少的, 因而本征半导体的导电能力是很弱的。本征半导体中的载流子的浓度除与半导体材料本身的性质有关以外, 还与温度密切相关, 随着温度升高, 载流子的浓度近似按指数规律增大。

### 1.1.2 杂质半导体

如前所述, 本征半导体虽有自由电子和空穴两种载流子, 但由于数量极少, 故导电能力低, 但若在其中掺入少量其他元素(称为杂质), 可以形成杂质半导体, 从而使半导体的导电性能发生显著的改变。利用这一特性, 制成了各种性能的半导体器件。

由掺入杂质的不同, 杂质半导体可分为电子型半导体和空穴型半导体两种。因为电子带负电(取英文单词“Negative”(负)的第一个字母), 电子型半导体又称为 N 型半导体; 因为空穴带正电(取英文单词“Positive”(正)的第一个字母), 空穴型半导体又称为 P 型半导体。

假若在本征半导体中掺入三价或五价的杂质, 只要温度高于  $50\text{ K}$ , 杂质几乎全部电离, 杂质浓度便是一个定值, 与温度无关。

## 1. N型半导体

在本征半导体中掺入少量的五价元素,如磷、砷、锑等,由于掺入的五价元素的原子数目相对于硅原子很少,因此整个晶体结构基本不变,只是各五价元素取代了一个四价元素在晶体中的位置,如图 1.3 所示,这就是 N 型半导体。磷原子有五个价电子,其中四个与硅(锗)原子结合成共价键,余下的一个价电子在共价键之外,磷原子对它的束缚力较共价键弱得多,因此,只需较少的能量,就可以使它激发成为自由电子,从晶体结构上看,留下的则是不能移动的正离子。在常温下,每个五价原子都能释放(施舍)出一个自由电子,我们把这类能释放电子的杂质称为施主杂质。在 N 型半导体中,除了杂质给出的大量额外自由电子外,在半导体中尚有少量的由本征激发产生的电子空穴对。这就使该半导体中的自由电子数远大于空穴数,所以 N 型半导体中的自由电子称为“多数载流子”,简称“多子”;而空穴称为“少数载流子”,简称“少子”。参与导电的载流子以自由电子为主,因而称为电子型半导体。

## 2. P型半导体

在本征半导体中,掺入少量的三价元素,如硼、铝和镓等,就形成了 P 型半导体,如图 1.4 所示。硼原子在与硅(锗)原子构成共价键时,将因缺少电子而出现空位,在温度不是很高的情况下,周围共价键中的电子很容易跃迁到这里头,于是形成了一个空穴。从晶体结构上看,为了保证晶体呈电中性,硼原子将成为不能移的负离子。在 P 型半导体中,三价元素硼原子起着接受电子的作用,我们把这类能接受电子的杂质称为受主杂质。由于空穴的浓度远大于电子浓度,空穴为“多子”,电子为“少子”,P 型半导体的导电基本上决定于空穴的运动,所以 P 型半导体又称为空穴半导体。应当指出,在杂质半导体中虽然多子数远大于少子数,但由于在常温下杂质原子均已电离,且离子的极性与少子极性相同,所以正负电荷数相等,整个半导体仍呈电中性。

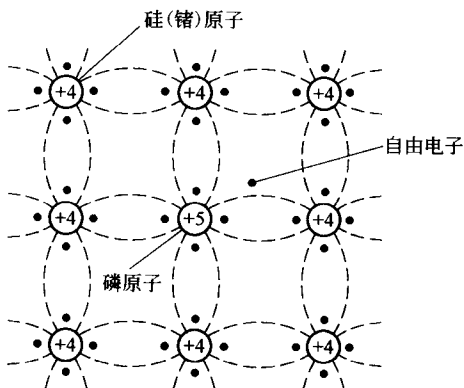


图 1.3 N 型半导体晶体结构示意图

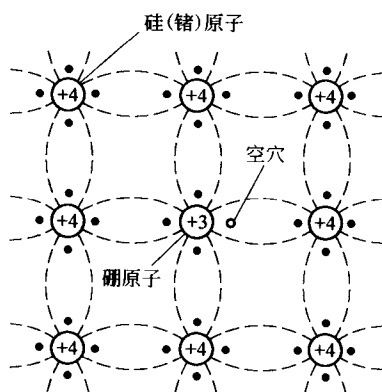


图 1.4 P 型半导体晶体结构示意图

### 1.1.3 漂移电流和扩散电流

#### 1. 漂移电流

当不外加电场的情况下,半导体中电子和空穴的运动是无规则的热运动,因而不形成电流。有外加电场作用时,电子和空穴便在热运动的基础上附加以定向运动(注意:实际上空穴的运动是由价电子逆电场方向依次填补共价键上的空位形成的)。这种载流子在电场力



作用下的定向运动称为漂移运动, 漂移运动产生的电流称为漂移电流。显然, 在外加电场作用下, 电子逆电场方向运动形成的电子电流  $I_n$  和空穴顺电场方向运动形成的空穴电流  $I_p$  方向是一致的, 故半导体中的总电流  $I = I_n + I_p$ 。漂移电流的大小将由半导体中载流子浓度、迁移速度及外加电场的强度等因素决定。

## 2. 扩散电流

如果半导体内载流子浓度分布不均匀, 那么无需电场力作用, 载流子便会从浓度高的区域向浓度低的区域运动。我们称这种由浓度差而引起的定向运动为扩散运动, 扩散运动所形成的电流称为扩散电流。

应注意, 半导体中某处的扩散电流大小主要取决于该处载流子的浓度差(即浓度梯度)。浓度差越大, 扩散电流越大, 而与该处载流子的浓度值无关。

# 1.2 PN 结及其特性

## 1.2.1 PN 结的形成

如果在—块 N 型(或 P 型)半导体基片上, 通过—定工艺掺入三价(或五价)杂质元素, 使其产生—个 P 型(或 N 型)半导体区间。这时, 在 N 区和 P 区之间的交界面附近将形成—个极薄的空间电荷层, 称为 PN 结。

在室温下, P 型半导体内每一个受主杂质将产生—个空穴, 同时形成—个负离子; N 型半导体内每一个施主杂质将产生—个自由电子, 同时形成—个正离子。

于是在两种杂质半导体的交界处, 由于 P 型半导体(又称 P 区)内空穴为多子, N 型半导体(又称 N 区)内电子为多子, 存在很大的浓度差异, 所以, 空穴将越过交界面由 P 区向 N 区运动。同理, 电子也会由 N 区向 P 区运动, 通常把这种现象称为扩散, 如图 1.5 所示。

扩散到对方的多子身分变成为少子, 很快就被复合掉了, 同时在交界面两侧留下了不能移动的正负离子, 形成—个正负离子区, 我们称之为空间电荷区, 如图 1.6 所示。这个区域的载流子因扩散和复合而消耗掉了, 所以又称为耗尽区。在交界面两边的正负电荷间必然

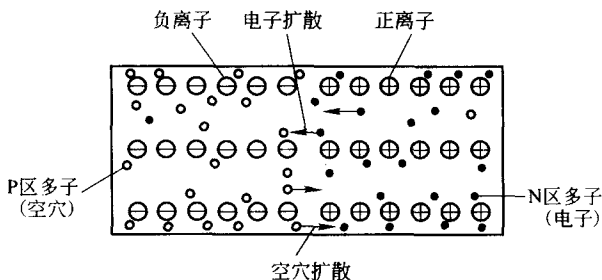


图 1.5 载流子分布浓度差引起扩散运动

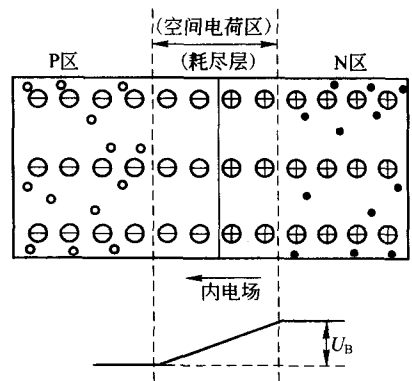


图 1.6 平衡状态下的 PN 结