

MONIDIANZI
JISHU

模拟电子 技术

主 编 梅开乡 梅军进

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

模拟电子技术

梅开乡 梅军进 主编

ISBN 978-7-302-17000-1
I. 模... II. 梅... III. 电子技术-教材 IV. TN710
中国版本图书馆CIP数据
2009.1
清华大学出版社

ISBN 978-7-302-17000-1
I. 模... II. 梅... III. 电子技术-教材 IV. TN710
中国版本图书馆CIP数据
2009.1
清华大学出版社

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

地址：北京市海淀区中关村大街40号
邮编：100081

电话：010-62223000

内 容 简 介

本书由半导体器件、基本放大电路、集成运算放大电路、负反馈放大电路、集成运放的线性应用、波形产生电路、功率放大电路、直流稳压电源电路等 8 章及 4 个附录组成。每章有内容提要、学习要求、本章小结、思考题与习题。

本书重点突出、强调应用、强调集成电路应用设计方面的指导。根据“任务驱动、案例教学”的现代教学方法,将基本概念、基本理论、基本技能寓教于各相应的“设计与制作”项目之中,充分调动学生学习的积极性与主动性。

本书可作为高等院校电气、电子、信息、机电工程及计算机等相关专业的“模拟电子技术”课程教材,也可作为自学考试、工程技术人员的学习参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/梅开乡, 梅军进主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1753 - 8

I. 模… II. ①梅…②梅… 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 187074 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 22

字 数 / 445 千字

版 次 / 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 2500 册

定 价 / 35.00 元

责任校对 / 申玉琴

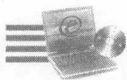
责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

前言

“模拟电子技术”是电子信息类、电气自动化类、计算机类、机械制造及其自动化类各专业的核心基础课,是学习后续专业课程以及今后从事实际工作必需的基础。编者在总结十几年教学改革实践经验的基础上,融入“任务驱动、案例教学”的现代教学理念,在教学内容的选取与编排方面,充分注意以下 8 点。

1. 以高速发展的集成运算芯片为主线,重点介绍集成芯片功能、性能参数、外部特性及其在模拟运算电路中的应用,在信号检测、转换、处理等电路中的应用。
2. 改变传统教材以晶体三极管及其放大电路为主,以 CMOS 管及其放大器为辅(甚至将其作为不选不学的选学内容)的内容体系,转为以占目前市场销售和使用 85% 以上份额的 CMOS 管及其放大电路为主,以晶体三极管及其放大电路为辅的内容体系。
3. 每个知识模块都有多个具有代表性、实用性、趣味性、容易动手制作的应用举例,全书列举了 36 例,既能激发学生学习“模拟电子技术”的兴趣,又能培养学生的职业能力、设计能力和创造能力。
4. 跟踪[美]哈佛大学经典教材《电子学》、[美]电子信息经典教材《电子器件与电路》等西方优秀的《模拟电子技术》教材的内容编排体系,全书正文中插图、照片 414 幅,数据表格 36 个,起到讲解生动、直观、易懂的视觉效果。
5. 注重介绍新器件、新技术、新应用、新动向,以适应模拟电子技术快速发展的需要。例如半导体器件单元中的激光二极管、快速开关二极管(FRD、UFRD、SI-SBD)、硅太阳能电池、照明 LED、功率场效应管(MOSFET)、绝缘门极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)。直流电源电路单元中的高频开关稳压电源和开关电源在电子节能灯中的应用。功率放大器单元中的 MOSFET 功率放大器、丁类开关音频功率放大器等内容。使知识紧密结合生产实际并注意及时跟踪先进技术的发展,让学生的“就业本领技高一筹”。
6. 附录 A、附录 B 中的常用集成运放芯片引脚图、主要性能参数,附录 C 中的电路仿真软件 EWB-Multisim 简介,为多路防盗报警器的设计、小功率开关电源的设计等模拟电子设



计项目提供硬、软件方面的支持,附录D中的思考题与习题参考答案方便学生的自检自评,自主学习。

7. 每个模块在教学之前有内容提要与学习要求方便学生自主预习,在教学结束后有本章小结方便学生自主复习。

8. 将传统教材中的负反馈电路、线性稳压电源电路、单管共射极放大器中的频率响应、晶体管放大器三种组态的微变等效电路分析等内容只作简单介绍。将对数运算、反对数运算电路、集成运放的内部组成电路、串联反馈式稳压电源的内部组成电路、镜像电流源、恒电流等内容删去不讲。

为了便于开展教学,本书免费提供电子教案,下载地址为 <http://www.bitpress.com.cn>。与本教材配套的辅导教材有《模拟电子技术学习指导与实训》、《模拟电子技术试题库(光盘)》等。书中标有“※”号的选讲内容,可根据不同专业的需求予以取舍。

本书第1章的1.1、1.2节由汪慧编写,第7章的7.1~7.3节由耿晶晶编写,第3、4、5、6章、附录由梅军进编写,第2、8章、1.3~1.7、7.4节由梅开乡编写,全书由梅开乡统稿。在编写过程中得到了黄石理工学院电气与电子信息学院的刘东汉、黄重生、黄磊、齐海兵、夏术泉、邱霞、高海洲、桂静宜等老师的鼎力相助,对书稿进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,真诚欢迎各位专家、同行、读者批评指正。编者的电子邮箱地址: cims-hs2006@163.com (另附建议教学学时分配表,各教学班可根据学时多少予以调整)。

编者



附:

建议教学学时分配表

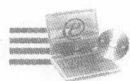
章	内 容	授课/h	实训/h	建议实训项目
1	半导体器件	8	2	1. 常用半导体器件参数的测试
2	基本放大电路	10	2	2. 场效应管放大电路动态参数测试及其应用
3	集成运算放大电路	6	4	3. 差分放大电路及其应用
4	负反馈放大电路	4		※4. 负反馈放大电路及其应用
5	集成运放的应用	12	2	5. 集成运放的指标测试及其调零
6	波形发生电路	4	※2	6. 集成运放在模拟运算电路中的应用
7	功率放大电路	6	2	7. 集成运放在有源滤波电路中的应用
8	直流电源电路	6	※2	※8. LC 正弦波振荡电路及其应用
合 计		56	※综合 4	9. 集成功率放大电路及其应用
				※10. 小功率简易开关电源的设计
				※11. OCL 功率放大电路的设计
				※12. 多路防盗报警器的设计

注: (1) 标有“※”记号的内容, 教师可以根据不同专业的需求或学时的多少予以取舍。

(2) 编者一般按每学时 4~6 页面的比例来撰写书稿。

目 录

第 1 章 半导体器件	1
内容提要	1
学习要求	1
1.1 半导体的特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.2 半导体二极管	3
1.2.1 PN 结及其单向导电性	4
1.2.2 二极管的伏安特性	5
1.2.3 二极管的主要参数	6
1.2.4 特殊用途二极管	6
1.2.5 半导体二极管的应用	8
1.3 场效应管 (FET)	10
1.3.1 绝缘栅型场效应管	10
1.3.2 MOS 场效应管的主要参数	14
1.3.3 使用场效应管的注意事项	16
1.3.4 结型场效应管 (JFET)	16
※1.4 双极型三极管 (BJT)	21
1.4.1 晶体三极管的结构	22
1.4.2 电流分配与放大原理	23
1.4.3 三极管的特性曲线	26
1.4.4 三极管的主要参数	28
※1.5 半导体光电器件	30
1.5.1 发光二极管 (LED) 及液晶器件 (LCD)	30
1.5.2 光敏二极管	32
1.5.3 光敏三极管	32
1.5.4 激光二极管	33
1.5.5 太阳能电池	34



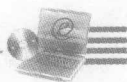
1.5.6 场致发光片和发光线 (EL)	35
※ 1.6 常用新型半导体器件	37
1.6.1 静电感应晶体管 (SIT、BSIT)	37
1.6.2 联栅晶体管 (GAT)	39
1.6.3 晶闸管	40
1.6.4 单结晶体管 (UJT)	43
※ 1.7 半导体器件应用举例	46
1.7.1 光控低功耗 LED 楼道灯	46
1.7.2 延时自动断电开关	47
1.7.3 光控太阳能草坪灯	47
1.7.4 病员呼叫护士装置	48
1.7.5 低功耗断线式防盗接触器	48
本章小结	50
思考题与习题	51
第 2 章 基本放大电路	56
内容提要	56
学习要求	56
2.1 概述	56
2.1.1 放大器的用途与分类	56
2.1.2 放大器的主要性能指标	58
2.2 场效应管 (FET) 放大电路	62
2.2.1 场效应管的直流偏置电路与静态分析	63
2.2.2 场效应管的小信号等效电路	65
2.2.3 共源极放大电路	66
2.2.4 共漏极放大电路	68
2.2.5 共栅极放大电路	70
2.2.6 场效应管三种放大电路的性能比较	73
※ 2.3 晶体三极管放大电路性能分析与比较	76
2.3.1 共发射极放大电路	76
2.3.2 共集电极及共基极放大电路	81
2.3.3 放大电路静态工作点对非线性失真的影响	83
2.3.4 三极管三种基本放大电路性能的比较	85
2.3.5 放大电路的频率响应	86



2.4 多级放大电路	90
※2.4.1 多级放大电路的级间耦合方式	91
※2.4.2 多级放大电路的静态、动态分析	94
※2.4.3 多级放大电路的交流参数计算	96
2.4.4 差分放大电路	97
※2.5 基本放大电路的应用举例	100
2.5.1 场效应管放大电路在“热释电型红外传感器”中的应用	100
2.5.2 三极管放大电路在“调频式无线话筒”中的应用	101
本章小结	101
思考题与习题	102
第3章 集成运算放大器	108
内容提要	108
学习要求	108
3.1 概述	108
3.1.1 集成运放的结构特点及其分类	109
3.1.2 集成运放的主要性能指标	112
3.2 典型集成运放简介	115
3.2.1 国产第二代通用集成单运放 F007	115
3.2.2 程控 CMOS 低漂移型四运放 MC14573	119
3.2.3 BICMOS 高增益型单片集成运放 CF3130	121
3.3 集成运放的电压传输特性与理想模型	123
3.3.1 集成运放的电压传输特性	123
3.3.2 理想集成运放的性能指标	123
3.3.3 集成运放工作在线性状态的特征	124
3.3.4 理想集成运放工作在非线性区的特点	125
3.4 集成运放的正确使用	126
3.4.1 根据运放的引脚排列图判别引脚功能、测试其参数	126
3.4.2 调零与消除自激振荡	127
3.4.3 集成运放的安全保护	128
3.5 集成运放的主要参数测试 (以 F007 为例)	129
本章小结	132
思考题与习题	133



第4章 负反馈电路	137
内容提要	137
学习要求	137
4.1 概述	137
4.1.1 反馈及反馈的基本关系式	138
※4.1.2 反馈的类型与判别	139
4.2 负反馈对放大电路性能的影响	142
4.2.1 提高放大倍数的稳定性	142
4.2.2 展宽通频带	144
4.2.3 减小反馈环内的非线性失真	145
4.2.4 改变输入、输出电阻	146
4.3 负反馈放大电路的分析计算	148
4.3.1 利用 $A_{uf} \approx 1/\bar{F}$ 反馈放大电路的闭环增益	148
4.3.2 利用 $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$ 来估算反馈电路的闭环增益	149
※4.4 负反馈放大电路的自激振荡及其消除方法	151
4.4.1 自激振荡产生的原因和条件	151
4.4.2 自激振荡的判断方法	152
4.4.3 消除自激的常用方法	153
※4.5 负反馈电路应用举例	155
本章小结	157
思考题与习题	159
第5章 集成运算放大器的线性应用	164
内容提要	164
学习要求	164
5.1 比例运算电路	164
5.1.1 反相比例运算电路	165
5.1.2 同相比例运算电路	166
5.1.3 差分比例运算电路	167
5.1.4 AD522 精密单片集成测量放大器及其应用	168
5.2 加减运算电路	171
5.2.1 反相输入求和电路	171
5.2.2 同相输入求和电路	172
5.2.3 减法运算电路	173



5.2.4 加减运算电路	174
5.3 积分运算和微分运算电路	175
5.3.1 积分运算电路	175
5.3.2 微分运算电路	177
5.4 有源滤波器	179
5.4.1 低通滤波器 (LPF)	180
5.4.2 高通滤波电路 (HPF)	182
※5.4.3 带通滤波电路 (BPF)	183
※5.4.4 带阻滤波电路 (BEF)	185
5.5 电压比较电路	186
5.5.1 单限电压比较电路	187
5.5.2 滞回电压比较电路	189
5.5.3 窗口电压比较电路	191
5.5.4 集成电压比较器	192
※5.6 集成运放的应用举例	197
5.6.1 集成运放在“湿度检测报警器”中的应用	197
5.6.2 集成运放在“接近式防盗报警器”中的应用	198
5.6.3 集成运放在“无线防盗报警器”中的应用	199
5.6.4 集成运放在开关电源 PWM 型控制芯片 SG3524 中的应用	201
本章小结	203
思考题与习题	204
第 6 章 波形产生电路	210
内容提要	210
学习要求	210
6.1 正弦波振荡电路	211
6.1.1 概述	211
6.1.2 RC 正弦波振荡电路	214
6.1.3 LC 正弦波振荡电路	216
6.1.4 石英晶体振荡器	223
※6.2 非正弦波产生电路	227
6.2.1 方波产生电路	227
6.2.2 三角波产生电路	230
6.2.3 锯齿波产生电路	232



6.3 集成函数发生器 ICL8038	233
※6.4 波形发生器的设计	235
6.4.1 设计要求	235
6.4.2 方案论证	235
6.4.3 系统设计	236
6.4.4 系统测试与评价	237
本章小结	239
思考题与习题	240
第7章 功率放大器	244
内容提要	244
学习要求	244
7.1 概述	244
7.1.1 功率放大电路的特点	244
7.1.2 功率放大电路的工作状态	245
7.1.3 功率放大器的种类	246
7.2 互补对称功率放大器	246
7.2.1 OCL 互补对称功率放大器	246
7.2.2 OTL 互补对称功率放大器	252
※7.3 集成功率放大器	255
※7.4 MOSFET (功率场效应管) 功率放大器	258
7.4.1 功率 MOSFET 器件的优点	258
7.4.2 功率 MOSFET 器件的结构及主要参数	261
7.4.3 15W 高保真音频功率放大器	263
7.4.4 12W 低失真双通道集成功放 TDA1521A	264
7.4.5 丁类音频功率放大器	266
本章小结	268
思考题与习题	270
第8章 直流稳压电源电路	274
内容提要	274
学习要求	274
8.1 概述	274
8.1.1 电路的组成	274



8.1.2 高频开关稳压电源的优点	276
8.1.3 高频开关稳压电源的分类	276
8.2 线性直流稳压电源电路	276
8.2.1 单相整流电路	276
8.2.2 滤波电路	279
8.2.3 集成稳压器	281
8.3 高频开关型稳压电源电路	290
8.3.1 高频开关型稳压电源的结构	291
8.3.2 高频开关电源中的关键元器件	293
※8.3.3 由 SG3525 芯片构成的高频开关电源	297
※8.3.4 由 UC3842 芯片构成的开关电源	299
※8.4 开关电源在电子节能灯中的应用	303
8.4.1 开关电源构成节能灯的电子镇流器	303
8.4.2 DC/AC 转换电路分析	305
本章小结	308
思考题与习题	308
附录 A 常用集成运放芯片引脚图	312
附录 B 几种典型集成运放的主要参数表	316
附录 C 电路仿真软件 EWB-Multisim 简介	318
C.1 EWB-Multisim 特点	318
C.2 Multisim 窗口界面及其菜单和工具栏	319
C.3 元器件库及仪表库	322
C.4 Multisim 电路原理图绘制功能	325
C.5 Multisim 电路仿真分析功能	328
附录 D 部分思考题与习题参考答案	332
参考文献	336

第 1 章 半导体器件

内容提要

半导体器件是构成各种电子电路的基础器件。无论是分立元件电路还是集成电路，无论是模拟电路还是数字电路，都离不开半导体器件。本章首先介绍半导体材料的基本结构和导电特性，然后介绍 PN 结的形成及其单向导电性。半导体二极管由一个 PN 结构成，利用它可以组成整流电路、限幅电路、门电路、低电压稳压电路等多种应用电路。在此基础上介绍特殊二极管、场效应管（MOSFET）、双极性三极管（BJT）等常用半导体器件的基本结构、工作原理、伏安特性曲线、主要参数及典型应用。最后对 21 世纪常用的新型半导体器件的型号、性能参数、引脚排列图及典型应用等也作了简要的介绍。

学习要求

- (1) 掌握场效应管（MOSFET）的外部特性（包括输入特性和转移特性）、主要参数及其典型应用，正确理解其工作原理。
- (2) 掌握普通二极管和稳压管的外部特性、主要参数及典型应用，正确理解其工作原理。
- (3) 正确理解双极性三极管（BJT）的外部特性（包括输入特性和转移特性）、主要参数、典型应用及其工作原理。
- (4) 了解本征半导体、杂质半导体及 PN 结的形成。
- (5) 了解常用新型半导体器件的型号、性能参数、引脚排列图及应用。

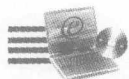
1.1 半导体的特性

导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体，硅（Si）和锗（Ge）的单晶体是常用的半导体材料，也是制作半导体器件的主要材料，其原子结构如图 1.1(a)、(b) 所示。

1.1.1 本征半导体

纯净的不含杂质的半导体材料的晶体称为本征半导体。

硅和锗的最外层 4 个电子受原子核束缚力最小，即称为价电子。硅和锗的原子简化结



构如图 1.1 (c) 所示。半导体的导电能力与价电子有关, 当环境温度升高或光照辐射加强时, 半导体释放价电子而使导电能力增强, 利用这种敏感特性可以做成各种热敏器件和光敏器件。

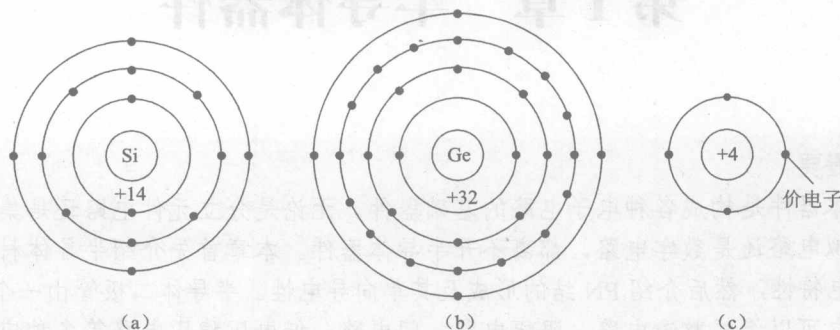


图 1.1 硅和锗的原子结构

(a) 硅原子结构; (b) 锗原子结构; (c) 简化结构

硅和锗晶体价电子受自身的原子核束缚, 既有自身的轨道, 又受相邻原子核吸引, 因此形成两个相邻原子共有一对价电子的共价键结构, 硅和锗晶体共价键结构, 如图 1.2 所示。硅或锗晶体在外界激发的情况下, 如常温下 (300 K), 少数价电子获得能量, 可以打破共价键的束缚成为自由电子。同时在价电子原来位置上留下一个空位, 称为“空穴”, 如图 1.3 所示为本征半导体中的自由电子和空穴。由于自由电子带负电荷, 所以失去价电子出现的空穴可看成带正电荷, 空穴所带电量与电子相等, 同样参与导电。

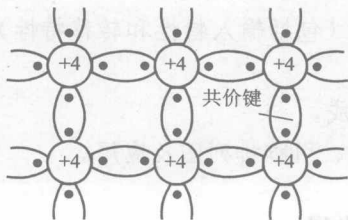


图 1.2 硅和锗晶体共价键结构

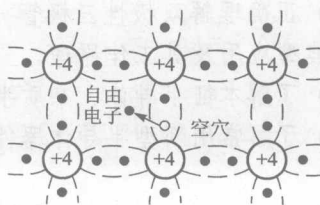


图 1.3 本征半导体中的自由电子和空穴

本征半导体中自由电子和空穴在外加电场作用下产生定向运动形成电流, 将这两种运载电流的粒子, 称为载流子。

在本征半导体中, 自由电子和空穴是成对出现的。不过, 它们相遇复合后会成对消失。当温度一定, 电子空穴对浓度维持一定。当温度升高, 如温度每升高 8°C , 硅的载流子浓度增加一倍; 温度每升高 12°C , 锗的载流子浓度增加一倍。因此, 本征半导体导电能力随温度上升而基本上按指数规律上升。



1.1.2 杂质半导体

本征半导体几乎不导电，在纯净的半导体中掺入某些特定的杂质，就成为杂质半导体，其导电能力会明显提高。杂质半导体按照掺入杂质的不同，可分为N型半导体和P型半导体两大类。

1. N型半导体

在硅（或锗）的晶体内掺入少量的磷、砷、锑等五价元素，因其有五个价电子，其中四个与周围的硅（或锗）原子组成共价键，多余一个价电子不受共价键的束缚，只要获得较小的能量就能挣脱磷原子核吸引而成为自由电子，如图1.4所示。磷原子掺入硅（或锗）晶体后就产生富余的电子，称为施主原子或N型杂质。在室温下，磷原子掺入硅（或锗）晶体后虽然也产生自由电子和正离子，即产生少量电子-空穴对，但自由电子数远大于空穴数。可见，N型半导体中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。这种杂质半导体以自由电子导电为主。

2. P型半导体

在硅（或锗）的晶体中掺入少量的硼、铟、铝等三价元素，则硼、铟、铝等原子有三个价电子，它与周围的硅（或锗）原子组成共价键，因缺少一个价电子便产生一个空穴。在室温下，硅（或锗）共价键上价电子填补硼原子的空位，则形成空穴移动，如图1.5所示。硼原子在硅（或锗）晶体中接受电子，称为受主原子或P型杂质。在室温下，硼原子电离为空穴和负离子，硅（或锗）晶体本身也产生少量电子空穴对，但空穴数远大于自由电子数。在P型半导体中，空穴为多数载流子，而自由电子为少数载流子。这种杂质半导体以空穴导电为主。

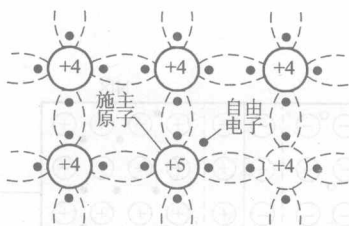


图 1.4 N型半导体

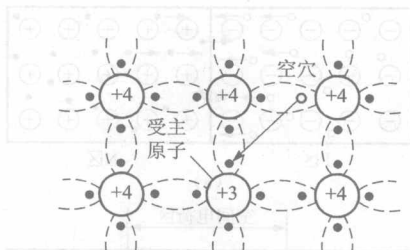


图 1.5 P型半导体

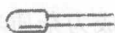
1.2 半导体二极管

在一块硅片上，用某些掺杂工艺一边制成P型半导体，另一边制成N型半导体，在它们交界面便形成PN结。对PN结进行封装并引出两个电极则称其为半导体二极管。常见的外形如图1.6所示。



1.2.1 PN 结及其单向导电性

本导半通第 1.1.1



在 P 区和 N 区交界处出现了电子和空穴的载流子浓度差，我们把载流子从浓度大的区域向浓度小的区域运动称为扩散；与之相反，载流子在内电场作用下的定向运动称为漂移。



1. PN 结的形成



当把 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，由于浓度差别，N 区电子载流子向 P 区扩散，P 区空穴载流子向 N 区扩散，如图 1.7 (a) 所示。多数载流子扩散到对方被复合掉了，PN 交界面消耗尽了，即称为“耗尽层”。同时，P 区留下不能移动的负离子，N 区留下不能移动的正离子，PN 交界面附近又可称为空间电荷区，即形成内电场，如图 1.7 (b) 所示。

图 1.6 半导体二极管外形

另一方面，内电场的作用使少子产生漂移运动，而内电场的方向正好阻挡扩散运动，使漂移运动的方向与扩散运动的方向相反，当两者达到动态平衡状态，就形成稳定的 PN 结。

2. PN 结的单向导电性

PN 结两端外加电压，平衡状态被打破，PN 结的单向导电性呈现出来。

当 P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为外加正向电压，也叫“正向偏置”，如图 1.8 所示，外电场方向与内电场方向相反，削弱了内电场。在外电场作用下，多数载流子向 PN 结移动，中和原来的部分离子，使空间电荷区变窄，有利于多子扩散运动。外加电压全部降落在 PN 结上，形成流入 P 区的较大正向电流，PN 结电阻减小，称之为导通状态。

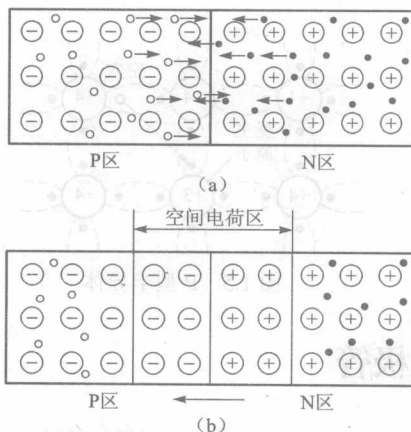


图 1.7 PN 结的形成

(a) 多子的扩散；(b) 平衡状态下的 PN 结

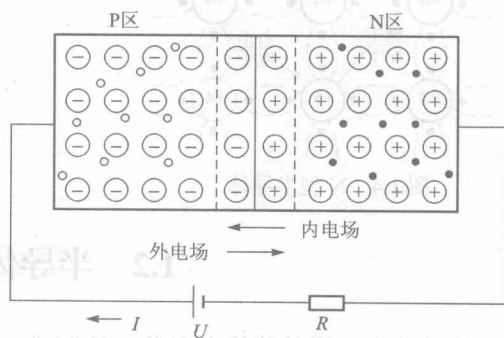


图 1.8 PN 结加正向电压时导通