

普通高等教育“十二五”规划教材

模拟电子技术

MO NI DIAN ZI JI SHU

主编 张剑 张勇



浙江工商大学出版社
ZHEJIANG GONGSHANG UNIVERSITY PRESS

模拟电子技术

主 编 张 剑 张 勇
副主编 肖必超 周树林
主 审 刘解生 段正忠 王 毅

浙江工商大学出版社
ZHEJIANG GONGSHANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术 / 张剑, 张勇主编. —杭州: 浙江工商大学出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-5178-0224-2

I. ①模… II. ①张… ②张… III. ①模拟电路—电子技术—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 006799 号

模拟电子技术

张剑 张勇 主编

责任编辑 刘 韵 汪 浩

封面设计 夜猫子品牌设计

责任印制 汪 俊

出版发行 浙江工商大学出版社

(杭州市教工路 198 号 邮政编码 310012)

(E-mail: zjgsupress@163.com)

(网址: <http://www.zjgsupress.com>)

电话: 0571-88904980, 88831806 (传真)

排 版 北京宣是国际文化传播有限公司

印 刷 北京市全海印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13.75

字 数 309 千

版 印 次 2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5178-0224-2

定 价 29.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江工商大学出版社营销部邮购电话 0571-88804228

内容简介

《模拟电子技术》本着“理论够用、重在实用”的原则，介绍了半导体二极管及其基本应用电路、半导体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路及集成运算放大器电路基础、负反馈放大电路、信号处理电路、波形发生电路、功率放大电路、直流稳压电源等知识。本书切合高职高专电气、电子类专业教学内容，适应规定的教学课时数，内容合理，便于教学。《模拟电子技术》选用了一定数量的思考题和习题，以利于巩固理论知识并加深对知识的理解，为进一步学习电子技术的其他课程的学习起到引导作用。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校的电气、电子、自动化、机电一体化等专业的教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

前言

“模拟电子技术”是电子技术类专业的一门专业主干课程，也是其他电气类及相近专业学生的一门重要专业技术基础课程。本书是根据“理论与实践并重”的高职教育教学理念，采取基于工作过程系统化的课程开发思路，而进行开发的教材。本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校的电气、电子、自动化、机电一体化等专业的教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

根据高职教育人才培养特色，坚持以职业需求为基础，以技能培训为主线，与行业企业合作进行的，基于工作过程系统化的课程开发和设计，体现了职业性、实践性和开放性的要求，突出了职业能力的课程标准建设思想。本课程在处理理论内容与实践能力的关系上，强调以能力为中心，以理论够用为出发点，按照高职高专人才培养目标，坚持“实际、实用、实践”的原则，结合模拟电子技术的典型应用设计学习目标、工作任务、技能训练项目，力求突出实用性和实效性。

教材介绍了半导体二极管及其基本应用电路、半导体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路及集成运算放大器电路基础、负反馈放大电路、信号处理电路、波形发生电路、功率放大电路、直流稳压电源等知识。本书选用了一定数量的思考题和习题，以利于巩固理论知识并加深对知识的理解，为进一步学习电子技术的其他课程的学习起到引导作用。

本书编写分工为：重庆水利电力职业技术学院张剑（第1章、附录Ⅰ、附录Ⅴ），黄才彬（第2.1、2.2、2.3节），吴桂仙（第2.4、2.5节），黄宇（第5.1节），郭颖智（第5.3节），丁祥（第6.1节），王绘宇（第6.2、6.3节），张勇（第7章、第9章、附录Ⅱ、附录Ⅲ、附录Ⅳ），张莉（第8.1节），钟其明（第8.2、8.3节），肖必超、刘福玉、唐荣波（第4.4节），杨红、李波（第5.2节），重庆正大软件职业技术学院周树林（第3章），重庆民生职业技术学院陶洪春（第4.1、4.2节），刘丽（第4.3节），株洲职业技术学院王同业（第5.2节）。全书由重庆水利电力职业技术学院张剑，张勇任主编，并负责全书统稿，肖必超、周树林任副主编。

本书由重庆科技学院刘解生教授、重庆水利电力职业技术学院段正忠副教授、王毅任主审，他们给本书的编写提了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者
2013年7月

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本应用电路	(1)
1.1 半导体二极管	(3)
1.1.1 PN 结	(3)
1.1.2 半导体二极管的结构和符号	(7)
1.1.3 半导体二极管的伏安特性	(7)
1.1.4 半导体二极管的使用常识	(9)
1.2 半导体二极管的等效电路及应用	(9)
1.2.1 理想二极管伏安特性	(10)
1.2.2 二极管固定压降伏安特性	(10)
1.2.3 二极管整流电路	(10)
1.2.4 二极管限幅电路	(12)
1.3 特种二极管	(13)
1.3.1 稳压二极管	(13)
1.3.2 发光二极管	(15)
1.3.3 光电二极管	(16)
小 结	(17)
复习思考题	(18)
第 2 章 半导体三极管及其基本放大电路	(20)
2.1 半导体三极管	(20)
2.1.1 三极管的结构与符号	(20)
2.1.2 三极管的放大原理	(21)
2.1.3 三极管的特性曲线	(23)
2.1.4 三极管的使用常识	(25)
2.2 基本放大电路	(27)
2.2.1 基本放大电路的组成和元件作用	(27)
2.2.2 基本放大电路的工作情况	(28)
2.2.3 交流通路和直流通路	(30)
2.3 基本放大电路的分析方法	(30)
2.3.1 用图解法分析基本放大电路	(30)
2.3.2 用等效电路法分析共发射极基本放大电路	(33)
2.3.3 用等效电路法分析共集电极基本放大电路	(37)
2.3.4 用等效电路法分析共基极基本放大电路	(40)
2.4 稳定静态工作点的放大电路	(42)

2.4.1 温度对静态工作点的影响	(42)
2.4.2 分压式工作点稳定电路	(43)
2.5 特殊三极管	(46)
2.5.1 光电三极管	(46)
2.5.2 光电耦合器	(47)
小 结	(47)
复习思考题	(49)
第3章 场效应管及其基本放大电路	(54)
3.1 结型场效应管	(55)
3.1.1 结型场效应管的结构、符号和工作原理	(55)
3.1.2 结型场效应管的特性曲线	(57)
3.1.3 场效应管的主要参数	(59)
3.2 绝缘栅场效应管	(60)
3.2.1 增强型绝缘栅场效应管	(61)
3.2.2 耗尽型绝缘栅场效应管	(63)
3.2.3 各种场效应管的特性比较及使用注意事项	(65)
3.3 场效应管放大电路	(67)
3.3.1 场效应管的偏置电路及静态分析	(67)
3.3.2 场效应管放大电路的动态分析	(69)
小 结	(72)
复习思考题	(73)
第4章 多级放大电路及集成运算放大器电路	(77)
4.1 多级放大电路	(78)
4.1.1 级间耦合方式	(78)
4.1.2 多级放大电路的性能指标估算	(80)
4.1.3 放大电路的频率特性	(81)
4.2 差动放大电路	(82)
4.2.1 基本差动放大电路	(82)
4.2.2 带公共射极电阻的差动放大电路	(84)
4.2.3 具有恒流源的差动放大电路	(87)
4.3 集成运算放大器	(88)
4.3.1 集成运算放大器的性能指标	(88)
4.3.2 集成运放的一些特殊参数含义	(89)
4.4 集成运算放大器的基本分析方法和基本运算电路	(91)
4.4.1 理想运算放大器及其分析特点	(91)
4.4.2 集成运算放大器的简单应用	(92)
小 结	(96)
复习思考题	(96)

第 5 章 负反馈放大电路	(99)
5.1 负反馈的基本概念	(99)
5.1.1 反馈的含义	(99)
5.1.2 反馈的类型及判断方法	(100)
5.1.3 反馈的类型及判断方法	(101)
5.2 负反馈对放大电路性能的影响	(103)
5.2.1 提高了放大倍数的稳定性	(103)
5.2.2 减小非线性失真以及抑制干扰和噪声	(103)
5.2.3 扩展通频带	(104)
5.2.4 对输入电阻和输出电阻的影响	(105)
5.3 负反馈放大电路的估算方法	(106)
5.3.1 电压串联负反馈的估算方法	(107)
5.3.2 其他三种组态放大电路的估算方法	(109)
小 结	(111)
复习思考题	(112)
第 6 章 信号处理电路	(115)
6.1 有源滤波电路	(116)
6.1.1 低通滤波电路	(117)
6.1.2 高通滤波电路	(120)
6.1.3 带通滤波电路和带阻滤波电路	(120)
6.2 高精度整流电路	(122)
6.2.1 高精度半波整流电路	(122)
6.2.2 高精度全波整流电路	(123)
6.3 电压比较器	(124)
6.3.1 简单的电压比较器	(124)
小 结	(126)
复习思考题	(126)
第 7 章 波形发生电路	(129)
7.1 正弦波振荡电路	(130)
7.1.1 正弦波振荡电路的基本知识	(130)
7.1.2 RC 正弦波振荡电路	(131)
7.1.3 LC 正弦波振荡电路	(132)
7.1.4 石英晶体振荡电路	(136)
7.2 非正弦波形发生电路	(139)
7.2.1 矩形波发生电路	(139)
7.2.2 三角波发生电路	(141)
7.2.3 锯齿波发生电路	(141)
7.3 低频信号发生器的参数测试	(142)

7.3.1 测试步骤与技巧	(142)
7.3.2 测试	(143)
7.3.3 低频信号发生器的故障排除	(144)
小 结	(145)
复习思考题	(145)
第8章 功率放大电路	(148)
8.1 功率放大电路概述	(149)
8.1.1 功率放大电路的特点	(149)
8.1.2 功率放大电路的分类	(149)
8.2 互补对称功率放大电路	(150)
8.2.1 乙类双电源互补对称功率放大电路	(150)
8.2.2 甲乙类互补对称功率放大电路	(154)
8.2.3 复合互补对称功率放大电路	(155)
8.2.4 单电源互补对称功率放大电路	(156)
8.3 集成功率放大电路	(157)
8.3.1 LM386 集成功率放大器	(157)
8.3.2 TDA2030 集成功率放大电路	(157)
8.3.3 CD4100 系列集成功率放大电路	(158)
小 结	(159)
复习思考题	(160)
第9章 直流稳压电源	(162)
9.1 概 述	(163)
9.2 并联和串联型稳压电路	(165)
9.2.1 并联型稳压电路	(165)
9.2.2 串联型稳压电路	(166)
9.3 集成稳压电路	(167)
9.3.1 概 述	(167)
9.3.2 三端固定输出集成稳压器	(168)
9.3.3 三端可调输出集成稳压器	(169)
9.3.4 开关集成稳压电源	(171)
小 结	(173)
复习思考题	(173)
附录 I 手工电子焊接技术与电子设备设计、制作实例	(176)
附录 II 部分符号说明	(191)
附录 III 图形符号说明	(193)
附录 IV 半导体器件型号命名方法	(195)
附录 V 常用器件的参数	(200)
参考文献	(209)

第 1 章

半导体二极管及其基本应用电路

[本章导读]

本章主要介绍了半导体的基本知识、普通二极管的特性和主要参数及应用，最后简要介绍了几种特殊二极管。

[学习目标]

- 了解半导体基础知识、二极管的结构和符号。
- 理解二极管的伏安特性和主要参数。
- 掌握二极管的单向导电性、反向击穿特性、电容效应和光电效应。
- 应用二极管组成的电路滤波、整流和限幅。

[引导案例]

半导体器件，就是利用半导体材料制成的器件的总称。如半导体二极管、半导体整流器、晶体管、光敏电阻、热敏电阻、半导体光电池、半导体温差发电机、半导体制冷器、半导体激光器、半导体微波功率源及半导体集成电路等。

用半导体做成的器件其种类十分繁多，其中最主要的是半导体电子器件和半导体光电器件两大类。

半导体电子器件最基本的两种器件是晶体二极管（简称二极管）和晶体三极管（简称晶体管）。

晶体二极管的基本结构是由一块 P 型半导体和一块 N 型半导体结合在一起形成一个 PN 结。在 PN 结的交界面处，由于 P 型半导体中的空穴和 N 型半导体中的电子要相互向对方扩散而形成一个具有空间电荷的耗尽层。这耗尽层阻止了空穴和电子的继续扩散而使 PN 结达到平衡状态。当 PN 结的 P 端（P 型半导体那边）接电源的正极而另一端接负极时，空穴和电子都向耗尽层流动而使耗尽层变薄，电流很快上升。如果把电源的方向反过来接，则空穴和电子都背离耗尽层流动而使耗尽层变厚，同时电流被限制在一个很小的饱和值内（称反向饱和电流）。因此，PN 结具有单向导电性。此外，PN 结的耗尽层还起一个电容的作用，这电容随着外加电压的变化而变化，在耗尽

层内部电场很强，当外加反向电压达到一定阈值时，耗尽层内部会发生雪崩击穿而使电流突然增加几个数量级。利用PN结的这些特性在各种应用领域内制成的二极管有：整流二极管、检波二极管、变频二极管、变容二极管、开关二极管、稳压二极管（曾纳二极管）、崩越二极管（碰撞雪崩渡越二极管）和俘获二极管（俘获等离子体雪崩渡越时间二极管）等。此外，还有利用PN结特殊效应的隧道二极管，以及没有PN结的肖脱基二极管和耿氏二极管等。

半导体光电器件大致可分为四类：光电探测器、发光二极管、半导体激光器和光电池。

光电探测器的功能是把微弱的光信号转换成电信号，然后经过放大器将电信号放大，从而达到检测光信号的目的。光敏电阻是最早发展的一种光电探测器。它利用了半导体受光照后电阻变小的原理。此外，光电二极管、光电池都可以用作光电探测元件。十分微弱的光信号，可以用雪崩光电二极管来探测。它是把一个PN结偏置在接近雪崩的偏压下，微弱光信号所激发的少量载流子通过接近雪崩的强场区，由于碰撞电离而数量倍增，因而得到一个较大的电信号。除了光电探测器外，还有与它类似的用半导体制成的粒子探测器。

半导体发光二极管的结构是一个PN结，它正向通电流时，注入的少数载流子靠复合而发光。它可以发出绿光、黄光、红光和红外线等。所用的材料有GaP、GaAs、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$ 、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{Py}$ 等。

如果使高效率的半导体发光管的发光区处在一个光学谐振腔内，则可以得到激光输出，这种器件称为半导体激光器或注入式激光器。最早的半导体激光器所用的PN结是同质结，以后采用双异质结结构。双异质结激光器的优点在于它可以使注入的少数载流子被限制在很薄的一层有源区内复合发光，同时由双异质结结构组成的光导管又可以使产生的光子也被限制在这层有源区内。因此双异质结激光器有较低的阈值电流密度，可以在室温下连续工作。

当光线投射到一个PN结上时，由光激发的电子空穴对受到PN结附近的内在电场的作用而向相反方向分离，因此在PN结两端产生一个电动势，这就成为一个光电池。把太阳能转换成电能的太阳能光电池近年来很受人们重视。最先应用的太阳能光电池都是用单晶硅制造的，成本太高，不能大量推广使用。目前国际上都在寻找成本低的太阳能光电池，用的材料有多晶硅和无定形等。

除了上述两大类半导体器件外，利用半导体的其他特性做成的器件还有热敏电阻、霍尔器件、压敏元件、气敏晶体管 and 表面波器件等。

1.1 半导体二极管

1.1.1 PN 结

1. 半导体的特性

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的一种物质。常用的半导体材料有元素半导体，如硅（Si）、锗（Ge）等；化合物半导体，如砷化镓（GaAs）等；以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料，如硼（B）、磷（P）、铟（In）和锑（Sb）等。其中硅和锗是目前最常用的半导体材料。半导体具有不同于其他物质的独特性质，主要有以下三点：

①热敏特性

当温度升高时，半导体的导电性会增强，温度越高，导电能力越强。利用这一特性可以制成热敏电阻。

②光敏性

光照加强时，半导体的阻值显著下降，导电能力增强。利用这一特性可以制成光敏传感器、光电控制开关及火灾报警装置等。

③掺杂性

在纯度很高的半导体中掺入微量的某种杂质元素，其导电性将会显著增加。利用掺杂性可制成各种不同性能、不同用途的半导体器件，例如二极管、三极管、场效应管等。

(1) 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净、结构完整的半导体晶体。半导体的重要物理特性是它的电导率，电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子（即可移动的带电粒子，如自由电子等）的数目有关。电荷载流子的浓度愈高，其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素，包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在。在热力学温度为零开（ $T=0\text{ K}$ ，相当于一 273.15°C ）时，价电子不能挣脱共价键的束缚，也就不能自由移动，所以共价键内的价电子又称为束缚电子。这样，本征半导体中虽有大量的价电子，但没有自由电子，此时半导体是不导电的。但是，半导体的

共价键实际上是一种“松散联合”的结构，其中的价电子并不像在绝缘体中被束缚得很紧。当温度升高或受光照射时，价电子以热运动的形式不断从外界获得一定的能量，少数价电子因获得的能量较大从而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，如图 1.1

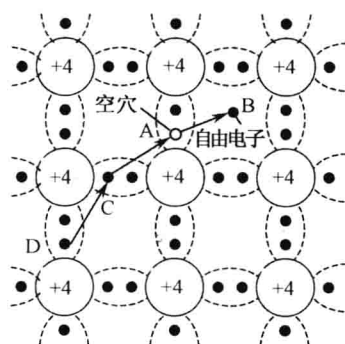


图 1.1 本征激发现象

(B处)所示,这种现象称为本征激发。

在本征半导体中存在两种载流子,带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。在本征激发产生电子-空穴对的同时,自由电子在运动中因能量的损失有可能和空穴相遇,重新被共价键束缚起来,电子-空穴对消失,这种现象称为“复合”。在一定的温度下,激发和复合都在不停地进行,但最终将处于动态平衡状态,这时半导体中的载流子浓度保持在某一定值。

由于本征激发产生的电子-空穴对的数目很少,载流子浓度很低,因此,本征半导体的导电能力很弱。

(2) 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著改变。根据掺入的杂质不同,杂质半导体分为 N 型和 P 型两大类。

① N 型半导体

在四价元素的硅(或锗)晶体中,掺入微量的五价元素磷(或砷、锑等)后,磷原子将散布于硅原子中,且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。磷原子有五个价电子,它以四个价电子与周围的硅原子组成共价键,多余的一个价电子处于共价键之外。由于这个价电子不受共价键的束缚,因此使杂质磷的原子变成带正电荷的离子,如图 1.2 (a) 所示。由于这种杂质原子可以提供电子,因此称为施主杂质。施主原子的数目虽然不多,但在室温下每掺入一个施主原子,都能产生一个自由电子和一个正离子,自由电子则成为该杂质半导体主要的导电载流子。正离子被束缚在晶体点阵中,不能自由移动,对半导体的导电毫无作用。掺入的杂质越多,杂质半导体的导电性能越好。

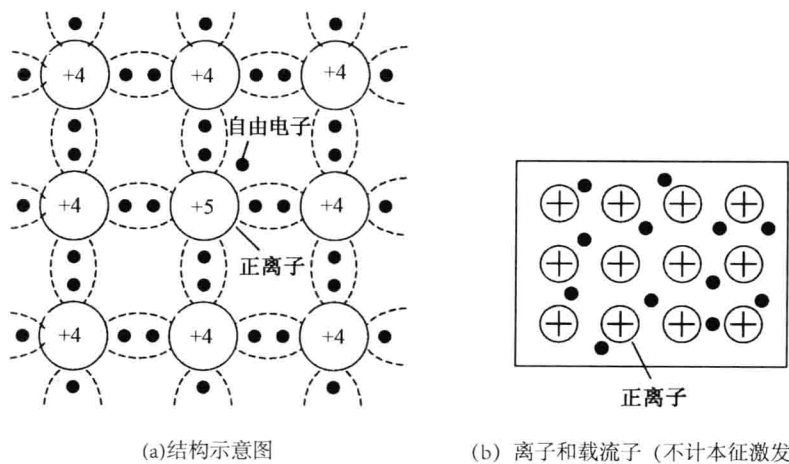


图 1.2 N 型半导体

通常,掺杂所产生的自由电子浓度远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度,所以杂质半导体的导电性能远超过本征半导体。显然,这种半导体中自由电子浓度远大于空穴浓度,所以称电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。因为这种半导体的导电主要依靠电子,所以称为 N 型半导体。

不难理解, N型半导体总体上仍为电中性, 其多子(电子)的浓度取决于所掺杂质的浓度, 而少子(空穴)是由本征激发产生的, 因此它的浓度与温度或光照密切相关。为了突出 N型半导体导电特性的主要特征, 通常把 N型半导体画成图 1.2 (b) 所示的简化形式, 其中的自由电子和正离子总是成对出现, 当然, 在某些场合还需要考虑 N型半导体受热激发而产生的少子的影响。

② P 型半导体

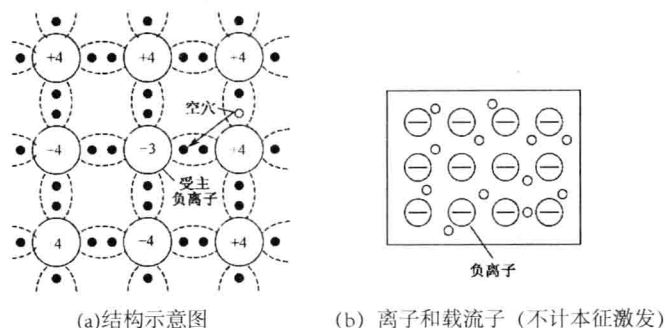


图 1.3 P 型半导体

在硅(或锗)的晶体中掺入微量的三价元素硼(或铝、镓等)后, 杂质原子也散布于硅原子中, 且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。由于硼原子只有三个价电子, 它与周围的硅原子组成共价键时, 因缺少一个电子而产生一个空位, 在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填补, 于是杂质原子变为带负电荷的离子, 而邻近硅原子的共价键因缺少一个电子, 出现了一个空穴, 如图 1.3 (a) 所示。由于这种杂质原子能吸收电子, 因此称为受主杂质。受主负离子不能移动, 也不参与导电, 只有空穴才对杂质半导体的导电做贡献。同样, 掺入的杂质越多, 其导电性能越好。

在室温下, 每掺入一个受主原子, 都能产生一个空穴和一个负离子。在这种半导体中, 空穴是多子, 自由电子是少子, 它的导电主要依靠空穴, 因此称为 P 型半导体。

与 N 型半导体类似, P 型半导体总体上也是电中性的, 其多子(空穴)的浓度取决于所掺杂质的浓度, 少子(电子)的浓度与温度或光照密切相关。为了突出 P 型半导体导电特性的主要特征, 通常把 P 型半导体画成如图 1.3 (b) 所示的简化形式, 它的空穴和负离子总是成对地出现。

2. PN 结的形成与特性

(1) PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体接触以后, 由于交界两侧半导体类型不同, 存在电子和空穴的浓度差。这样, P 区的空穴向 N 区扩散, N 区的电子向 P 区扩散, 如图 1.4 (a) 所示。由于扩散运动, 在 P 区和 N 区的接触面就产生正负离子层。N 区失掉电子产生正离子, P 区得到电子产生负离子。通常称这个正负离子层为 PN 结。如图 1.4 (b) 所示。

在 PN 结的 P 区一侧带负电, N 区一侧带正电。PN 结便产生了内电场, 内电场的方向从 N 区指向 P 区。内电场对扩散运动起到阻碍作用, 电子和空穴的扩散运动随着

内电场的加强而逐步减弱，直至停止。在界面处形成稳定的空间电荷区，如图1.4 (b) 所示。

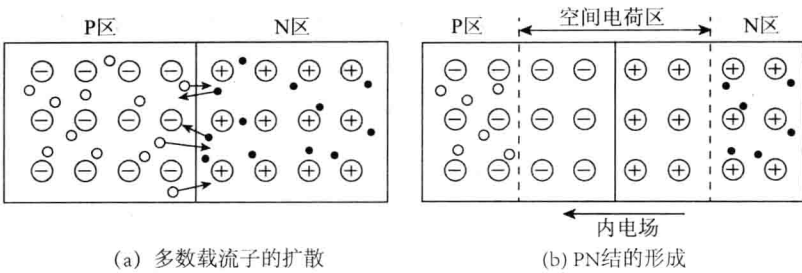


图 1.4 PN 结的形成

(2) PN 结的特性

①PN 结的正向导通特性

给 PN 结加正向电压，即 P 区接正电源，N 区接负电源，此时称 PN 结为正向偏置，如图 1.5 (a) 所示。

这时 PN 结外加电场与内电场方向相反，当外电场大于内电场时，外加电场抵消内电场，使空间电荷区变窄，有利于多数载流子运动，形成正向电流。外加电场越强，正向电流越大，这意味着 PN 结的正向电阻变小。

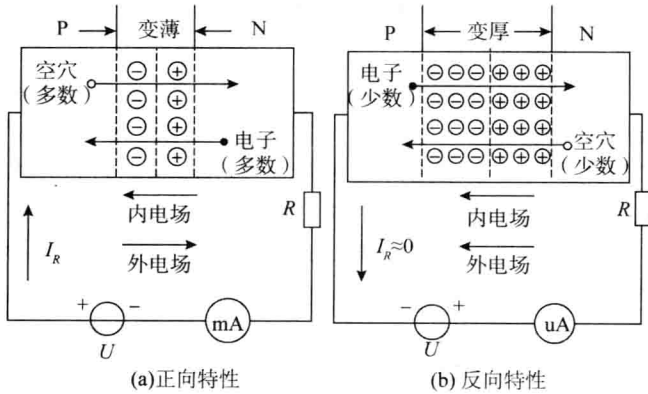


图 1.5 PN 结的导电特性

②PN 结的反向截止特性

给 PN 结加反向电压，即电源正极接 N 区，负极接 P 区，称 PN 结反向偏置，如图 1.5 (b) 所示。这时外加电场与内电场方向相同，使内电场的作用增强，PN 结变厚，多数载流子运动难于进行，有助于少数载流子运动，形成电流 I_R ，少数载流子很少，所以电流很小，接近于零，即 PN 结反向电阻很大。

综上所述，PN 结具有单向导电性，加正向电压时，PN 结电阻很小，电流 I_R 较大，是多数载流子的扩散运动形成的；加反向电压时，PN 结电阻很大，电流 I_R 很小，是少数载流子运动形成的。