

普通高等教育“十二五”规划教材

电 工 学

下册 电子技术

林 珊 陈国鼎 编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM/276

:2

2012

普通高等教育“十二五”规划教材

电 工 学

下 册

电 子 技 术

林 珊 陈国鼎 编

万 频 主审

北方工业大学图书馆



C00267561



机 械 工 业 出 版 社

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。该教材依据教育部颁发的工科高等学校“电工学”课程教学基本要求,在多年实际教学过程中,通过探索、改革和总结实践经验编写而成。

全书包括常用的半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、逻辑代数初步和基本逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、存储器与可编程逻辑器件等内容。

本书以工程实践中正在使用的电子技术基础理论为主,在突出电子电路的基本理论、基本分析方法的同时,注重理论联系实际。全书内容叙述上力求简明扼要,重点突出;将基本概念讲述清楚,易于读者接受理解;将基本分析方法讲解透彻,步骤明确,使读者容易掌握。分析过程更为紧凑,体系与内容均较新颖。书中配有针对性的思考与练习及习题,形式多样,配置齐全,难易度适中。书末附有部分习题参考答案,方便学生自学和教师施教。

本书适用于高等学校工科各专业,可以作为电工学相关课程的教材。该书对工程技术人员也有重要的参考价值,可供社会读者阅读。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电工学.下册,电子技术/林珊,陈国鼎编. —北京:机械工业出版社,2011.9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34463-6

I. ①电… II. ①林…②陈… III. 电工学-高等学校-教材②电工技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第182143号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 王小东

版式设计:张世琴 责任校对:樊钟英

责任印制:李妍

北京富生印刷厂印刷

2012年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.5印张·331千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34463-6

定价:27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

“电工学”课程是工科非电类各专业重要的专业技术基础课程，是各专业培养高技能人才必须具备的理论基础。科学技术的不断发展进一步加强了各学科之间的相互联系，电工电子技术越来越渗透到各学科，因此，“电工学”课程已不仅限于工科专业，众多理科类专业也将其作为必修课程。通过对该课程的学习，使学生获得必需的电工电子基础理论、电路分析计算能力及电工测量等基本知识与实践技能，为学习专业课程，树立理论联系实际的观点，培养实践能力、创新意识和创新能力，打下必要的基础。

近年来，我国高等教育为主动适应教育要面向现代化、面向世界、面向未来的需要，大力推动教学改革。随着教学改革的深化进行，作为工科非电类各专业的重要专业技术基础课程的“电工学”也发生了相当大的变化：知识点的更新、实际应用的推广、教学学时的减少、学生素质的提高等，这些因素都显示了教学改革的首要任务是进行教材改革。本书就是针对新的教学大纲、新的课程体系，在多年教学实践的基础上，总结多年的教学改革经验和科研成果，消化吸收国内外优秀教材的长处编写而成的。

传统的电工与电子技术在课程设置上着重追求内容的完整性和系统性，但是，随着当今社会学科的发展与细化，这种课程设置已经不太适合新形势的发展。教学改革的思路之一就是要把以往单一的、纵向的课程设置变为纵向和横向相互交汇的形式，以整体、融合、发展和应用的观念建立新的课程内容体系，打破原来的电工和电子、模拟和数字的界限，把课程内容层次化、模块化，以适应不同专业的要求，增加不同专业在课程内容选择方面的灵活性，使基础理论知识与应用更好地结合，较好地解决知识膨胀与课时紧张的矛盾。

本书按新教学大纲要求对传统的教学内容进行合理的精选、改写、补充和整合。本着“够用、实用、能用”的原则，降低了理论深度，压缩了基础性的原理叙述部分，不过分强调理论的系统性、严密性和完整性。除保留基础的传统内容外，削减了陈旧的复杂理论推导和应用较少的难记公式。增加了典型实例电路剖析的内容，这些实例注重理论联系实际，搭建了从理论到应用的桥梁，突出了电工电子技术在现实生活、生产中的应用。既增加了学生的学习兴趣，又引导学生思考，以便加强培养学生应用所学电工电子知识解决实际问题的意识与综合能力。同时，积极吸收当代的新知识、新观点和新技术，如增加可编程序控制器及其应用、大规模存储器、可编程逻辑器件、现场可编程逻辑阵列等内容。

该书的体系结构注重基础知识的内在关系，突出基本概念和基本原理，进一步理顺教学内容之间的关系。内容的编排与同类书有较大的调整，以遵循人的认知规律，更有利于学生按照严谨的思维方式接受相关的知识点，并采用比较有效和精练的方式把问题交代清楚，便于施教与自学，力求达到学以致用。这样做更有利于培养学生在教师指导下的自学能力。

本套教材包括《电工学（上册）——电工技术》和《电工学（下册）——电子技术》两本书，按通用教材的要求，能满足工科各非电类专业的需要。各章节内容之间具有相对的独立性，可以针对不同专业的特点，灵活选取相应的内容进行教学，以适应不同专业的需求。

本书是《电工学（下册）——电子技术》，全书共分8章，内容由浅入深，系统地介绍了电子技术的基础及应用。全书力求概念准确、内容新颖、深入浅出、语言流畅、可读性强。既注重基本原理必要的讲解，又力求突出工程上的实用性。明确指出本课程的重点和难点内容，以及学生在学习中的疑难之处与错误概念。书中有适量的且有针对性的例题、思考与练习题、习题，方便自学、易于教学。书中标有星号（*）的内容属于加深加宽的参考内容，可根据实际需要而有所取舍。习题中也有少量是标有星号（*）的，可供选用，以便在使用时具有一定的灵活性。

本书适用于高等学校工科各专业，可以作为电工学相关课程的教材，也可作为广大自学者学习电工学课程时的辅导参考书。同时，可以作为电子爱好者自学和实践的指导性参考书，对工程技术人员有一定的参考价值，也可供电工学教师教学参考。

本书第1、2、3、4章及附录A、附录B、附录C、附录D、附录E由广东工业大学自动化学院林珊编写，第5、6、7、8章由广东工业大学物理与光电工程学院陈国鼎编写，全书由林珊统稿。

本书由广东工业大学自动化学院的副院长万频主审。万频副院长对本书的编写给予了极大的支持和帮助，在百忙中对书稿进行了仔细的审阅，并提出中肯的修改意见。在此，对万频副院长表示衷心的感谢！

广东工业大学自动化学院的副院长谢云教授在本书的编写过程中也给予了大力的支持和帮助，并提出宝贵的意见，在此，对谢云教授表示衷心的感谢！物理与光电工程学院的胡义华院长、苏成悦副院长、电工电子部的有关领导以及各位老师对本书的编写及出版也都给予了大力的支持和帮助，在此，谨向他们致以衷心的感谢！

由于编者水平有限以及时间仓促，本书在某些方面所作的变动和尝试，以及书中的不足和不妥之处，殷切希望读者提出宝贵意见并予以批评指正，以便今后修订提高。

编 者

目 录

前言

第 1 章 常用的半导体器件..... 1

1.1 半导体的基础知识..... 1

1.1.1 本征半导体..... 2

1.1.2 杂质半导体..... 3

1.1.3 PN 结的形成及其单向导电性..... 5

1.2 半导体二极管..... 7

1.2.1 半导体二极管的基本结构..... 7

1.2.2 半导体二极管的伏安特性..... 9

1.2.3 二极管的主要参数..... 10

1.2.4 二极管的应用举例..... 11

1.2.5 特殊的半导体二极管..... 13

1.3 晶体三极管..... 16

1.3.1 晶体管的结构..... 17

1.3.2 晶体管的电流分配和放大原理..... 18

1.3.3 晶体管的伏安特性曲线..... 20

1.3.4 晶体管的主要参数..... 22

1.3.5 晶体管的小信号模型..... 23

1.4 场效应晶体管..... 25

1.4.1 绝缘栅型场效应晶体管的基本结构和工作原理..... 25

1.4.2 绝缘栅场效应晶体管的主要参数..... 29

1.4.3 绝缘栅场效应晶体管简化的小信号模型..... 29

1.4.4 绝缘栅场效应晶体管与普通晶体管的比较及使用注意事项..... 30

1.5 晶闸管..... 30

1.5.1 晶闸管的基本结构..... 30

1.5.2 晶闸管的工作原理..... 32

1.5.3 晶闸管的伏安特性..... 32

1.5.4 晶闸管的主要参数..... 33

1.5.5 晶闸管的测试与使用..... 33

习题..... 34

第 2 章 基本放大电路..... 37

2.1 概述..... 37

2.1.1 基本放大电路的组成..... 37

2.1.2 基本放大电路的工作原理..... 39

2.1.3 基本放大电路主要的动态性能指标..... 41

2.2 基本放大电路的分析..... 43

2.2.1 放大电路的直流通路与交流通路..... 43

2.2.2 基本放大电路的静态分析..... 44

2.2.3 基本放大电路的动态分析..... 46

2.3 常用的基本放大电路..... 50

2.3.1 分压式偏置电路..... 50

2.3.2 射极输出器..... 52

2.4 场效应晶体管放大电路..... 54

2.4.1 共源极放大电路的静态分析..... 55

2.4.2 共源极放大电路的动态分析..... 56

2.5 放大电路的频率特性..... 57

2.6 多级放大电路..... 58

2.6.1 多级放大电路的耦合方式..... 58

2.6.2 多级放大电路的分析..... 60

2.7 差动放大电路..... 61

2.7.1 零点漂移..... 61

2.7.2 差动放大电路的电路结构..... 61

2.7.3 差动放大电路抑制零漂的原理..... 62

2.7.4 差动放大电路的输入信号及输入和输出方式..... 62

2.8 功率放大电路..... 64

2.8.1 功率放大电路的特点..... 64

2.8.2 互补对称功率放大电路..... 65

习题..... 66

第3章 集成运算放大器	69	习题	125
3.1 集成运算放大器概述	69	第5章 逻辑代数初步和基本逻辑门	
3.1.1 集成运算放大器的组成	69	电路	127
3.1.2 集成运算放大器的主要参数	71	5.1 逻辑代数的基本知识	127
3.1.3 集成运算放大器的电压传输特性	72	5.1.1 数制和码制	127
3.1.4 理想集成运算放大器及其分析依据	72	5.1.2 逻辑代数中的基本和常用的逻辑运算	129
3.2 放大电路中的负反馈	74	5.1.3 逻辑代数中的基本公式和基本定理	132
3.2.1 反馈的概念	74	5.1.4 逻辑函数表示方法	134
3.2.2 负反馈的类型及其判断	77	5.1.5 逻辑函数的化简	137
3.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	80	5.2 集成逻辑门电路	141
3.3 运算放大器的应用	84	5.2.1 TTL 逻辑门电路	141
3.3.1 集成运算放大器在信号运算方面的应用	85	5.2.2 TTL “与非”门的技术参数	143
3.3.2 集成运算放大器在信号处理方面的应用	92	5.2.3 集电极开路 TTL 门	144
3.3.3 RC 正弦波振荡电路	97	5.2.4 三态输出门	145
3.3.4 电压比较器	99	5.3 CMOS 数字集成电路简介	145
3.4 使用集成运算放大器应注意的问题	102	习题	146
习题	104	第6章 组合逻辑电路	148
第4章 直流稳压电源	108	6.1 组合逻辑电路的分析和设计方法	148
4.1 整流电路	108	6.1.1 组合逻辑电路的分析方法	148
4.1.1 单相半波整流电路	109	6.1.2 组合逻辑电路的设计方法	151
4.1.2 单相桥式整流电路	110	6.2 加法器	153
4.2 滤波电路	112	6.2.1 加法器的电路结构和工作原理	153
4.2.1 电容滤波器	112	6.2.2 多位加法电路	155
4.2.2 电感滤波器	114	6.2.3 标准 MSI 加法器 74LS82、74LS283	155
4.2.3 复式滤波器	115	6.3 编码器	156
4.3 稳压电路	116	6.3.1 二进制编码器	156
4.3.1 稳压管稳压电路	116	6.3.2 优先编码器	157
4.3.2 恒压源	117	6.4 译码器	158
4.3.3 串联型稳压电路	117	6.4.1 二进制译码器	159
4.3.4 集成稳压电源	119	6.4.2 标准译码器 74LS138、74LS42 电路分析	159
4.4 单相可控整流电路	121	6.4.3 二-十进制译码器	161
4.4.1 单相半波可控整流电路	122	6.4.4 数字显示译码器	161
4.4.2 单相半波桥式整流电路	123		

6.5 数据选择器和数据分配器	164	8.2.2 只读存储器的内部结构	188
6.5.1 数据选择器	164	8.2.3 ROM 应用举例	189
6.5.2 数据分配器	165	8.2.4 各种 ROM 存储单元	190
习题	166	8.2.5 实际的 ROM 存储器	192
第7章 时序逻辑电路	168	8.3 随机存储器	194
7.1 双稳态触发器	168	8.3.1 随机存储器的组成	194
7.1.1 RS 触发器	168	8.3.2 各种 RAM 存储单元电路	195
7.1.2 JK 触发器	172	8.3.3 存储器芯片的扩展	196
7.1.3 D 触发器	174	8.3.4 常用的随机存储器	197
7.1.4 触发器逻辑功能的转换	174	习题	198
7.2 时序逻辑电路的分析	175	部分习题参考答案	199
7.3 寄存器	177	附录	201
7.3.1 数码寄存器	177	附录 A 半导体分立器件型号命名方法	201
7.3.2 移位寄存器	178	附录 B 半导体集成电路型号命名方法	202
7.4 计数器	180	附录 C 部分半导体分立器件的参数	203
7.4.1 同步二进制加法计数器	180	附录 D 常用模拟集成电路的参数和 符号	205
7.4.2 同步十进制加法计数器	181	附录 E 常用数字集成电路功能和外引线 排列	206
7.4.3 集成计数器	181	参考文献	207
习题	184		
第8章 存储器与可编程逻辑器件	187		
8.1 存储器概述	187		
8.2 只读存储器	188		
8.2.1 只读存储器的组成	188		

第 1 章 常用的半导体器件

电子技术就是研究电子元器件、电子电路及其应用的学科，已广泛地应用在自动控制、通信系统、电子测量技术、计算机系统等各个领域，深入渗透到人们的日常生活中。当电路所处理的是在时间上和数值上连续变化的模拟信号时，相应的电路称为模拟电子电路。而当处理的是在时间上和数值上都不连续的数字信号时，相应的电路称为数字电子电路。本书中第 1~4 章主要介绍模拟电子电路，第 5 章以后主要介绍数字电子电路。

要分析、研究和设计模拟电子系统，必须先掌握构成模拟电子电路最基本的电子元器件的基本结构、工作原理、特性和参数，这是深入学习电子电路的基础。当前，电子元器件已从电子管、分立半导体器件、小规模集成电路、中规模集成电路发展到大规模、超大规模集成电路。虽然现在的电子电路绝大部分使用集成电路，但半导体器件（如晶体二极管、晶体三极管等）是构成集成电路的核心。因此，本章首先介绍半导体的基础知识，然后讨论几种常用半导体器件的原理、特性及应用，为后面电子电路的分析与设计打基础。

1.1 半导体的基础知识

按导电能力的强弱，可将物质分为导体、绝缘体和半导体三类。物质的导电性能取决于原子结构。导体一般为低价元素，原子中最外层轨道上的电子（价电子）数目小于 4 个，极易挣脱原子核的束缚成为自由电子。当受到外电场的作用时，这些自由电子产生定向运动形成电流，呈现较好的导电性能，一般情况下，导体的电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。绝缘体一般为高价元素，最外层电子数目接近 8 个，受到原子核的束缚力强，极不容易摆脱原子核的束缚成为自由电子，因而导电性能极差，绝缘体的电阻率一般大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。所谓**半导体 (Semiconductor)**，就是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质的总称，如硅 (Si)、锗 (Ge)、硒 (Se) 以及大多数的金属氧化物和硫化物都是半导体。在电子技术中，目前常用的半导体材料是硅 (Si) 和锗 (Ge) 等。它们都是 4 价元素，原子中最外层轨道上有 4 个电子，其简化原子结构模型图如图 1-1 所示。最外层电子既不像导体那样极易挣脱原子核的束缚，成为自由电子，也不像绝缘体那样被原子核束缚得很紧，因而导电性能介于两者之间。

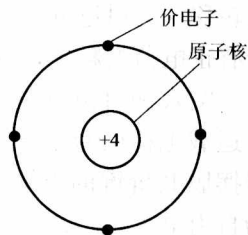


图 1-1 4 价元素简化原子结构模型图

半导体材料之所以有用，并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是很多半导体的导电能力在不同条件下有很大差异。例如有些半导体（如钴、锰、镍等的氧化物）对温度的反应特别灵敏，环境温度增高时，它们的导电能力要增强很多，各种热敏电阻就是利用半导体材料的这种热敏特性制成的。又如有些半导体（如镉、铅等的硫化物与硒化物）受到光照时，它们的导电能力变得很强；当无光

照时，又变得像绝缘体那样不导电，利用这种光敏特性就做成了各种光敏电阻。更重要的是，如果在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质元素后，它的导电能力就可增加几十万甚至几百万倍。利用这种特性就做成了各种半导体器件，如晶体二极管、晶体管、场效应晶体管及晶闸管等。

半导体为什么具有这些其他物质所没有的导电特性呢？根本原因在于半导体材料的原子结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体

用半导体材料制作半导体器件时，要高度提纯使之制成晶体，半导体一般都具有晶体结构，所以半导体也称为**晶体**，这就是晶体管名称的由来。这种完全纯净的、具有晶体结构的半导体称为**本征半导体 (Intrinsic Semiconductor)**。

在本征半导体的晶体结构中，原子按一定的规则整齐地排列，在空间形成排列整齐的点阵称为晶格。由于原子间的距离很近，最外层的价电子不仅受到所属原子核的吸引，还受到相邻原子核的吸引。这样，每一个原子的每一个价电子都与相邻原子的一个价电子组成一个电子对，这对价电子是每两个相邻原子共有的，构成**共价键 (Covalent Bonds)**结构。当大量的4价原子形成晶体结构时，每一个原子都与周围相邻的4个原子由于共价键而紧密地结合起来，形成稳定的三维空间立体结构。其平面示意图如图1-2所示。在晶体结构中，原子间距很小，相邻原子的价电子的运行轨道相互交迭，这就意味着此时围绕着一个原子核旋转的价电子，在下一个时刻会通过运行轨道的交迭区，转移到另一个原子核附近运动，并以这种方式不断转移，从而价电子可以在整个晶体的共价键内进行运动。

共价键结构使每个原子的最外层因具有8个电子而处于较为稳定的状态。但共价键对电子的束缚力毕竟不像绝缘体那样强，当温度升高或受到光照射时，共价键中的少数价电子因获得能量而挣脱共价键的束缚成为**自由电子 (Free Electron)**，同时在共价键内留下一个空位，相关原子会因丢失一个核外电子而成为正离子。相邻原子的价电子会很容易地转移过来填补这个空位，使该原子重新变成电中性，但相邻提供价电子的原子则变成正离子，如此持续下去。显然这种空位在晶体中也是可以移动的，且空位的移动伴随着正电荷（正离子）的转移。为讨论分析方便，把空位和正电荷合二为一，看成是一种可以在共价键内移动的、带有正电荷的粒子，称为**空穴 (Hole)**。

空穴和自由电子极性相反而所带电量相等，且都可以移动。因此，半导体中存在两种运载电荷的粒子——**载流子 (Carrier)**，即自由电子和空穴。每当价电子获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为一个自由电子，就会同时形成一个空穴，它们是成对出现的，称为**自由电子-空穴对**，这个过程是由于热运动产生的，称为**热激发 (或本征激发)**，如图1-3所示。

当半导体两端有外加电源时，一方面自由电子作定向运动，形成的电子电流。同时，共价键中的价电子递补空穴，从而形成空穴电流。因此，在半导体中，同时存在着电子导电和空穴导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属导体在导电机理上的本质差别。

在外加电场的作用下，带正电荷的空穴和带负电荷的自由电子的运动方向相反。把带正电荷的空穴移动方向作为电流方向，则反向运动的自由电子所形成的电流也与空穴电流同向。

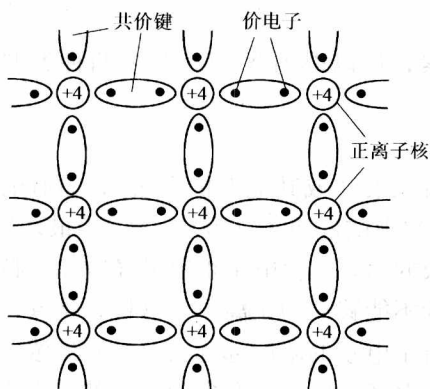


图 1-2 本征半导体共价键结构平面示意图

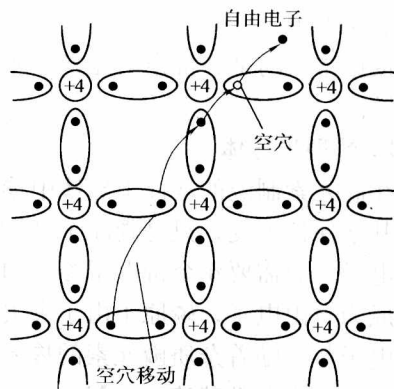


图 1-3 热激发（电子空穴对的形成）

如果用 I_p 表示空穴移动形成的电流，用 I_n 表示自由电子移动形成的电流，则总电流为两种载流子电流之和，即 $I = I_p + I_n$ ，半导体的导电机理如图 1-4 所示。

伴随着热激发的进行，自由电子和空穴在运动的过程中也会相遇，自由电子重新回到共价键中，变为价电子，于是自由电子和空穴成对消失，这一现象称为**复合**。在热激发中产生自由电子空穴对是价电子获得能量，摆脱共价键束缚的过程。而复合则是自由电子释放出所获得的能量，重新被共价键捕获的过程。

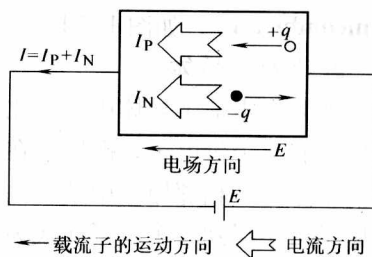


图 1-4 半导体的导电机理

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现，同时又不不断复合。在一定温度下，热激发和复合达到动态平衡，于是半导体中的载流子（自由电子和空穴）的数目基本维持不变。温度升高，获得能量挣脱束缚的价电子增多，产生的自由电子-空穴对数量增加，即载流子的浓度随之增加，电阻率减小，导电性能也就越好。因此，温度对半导体器件性能的影响很大。这就是为什么半导体材料的导电能力会随温度的改变而改变，即具有**热敏性**的原因。另外，在光（射）线直接照射半导体表面和在磁场、电场作用等环境下，价电子同样会因获得足够能量而摆脱共价键形成自由电子-空穴对，从而使半导体的导电能力明显增强，具有**光敏性**。但在一般情况下，本征半导体的载流子总数很少，导电能力并不强。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量极少，导电能力很弱。另外，本征半导体的导电能力不能人为进行控制，温度一定，本征半导体材料的载流子浓度就是一个定值，它的导电能力也就不能被改变了。为了提高半导体材料的导电能力，并且实现人为控制半导体材料的导电性，可以采用掺杂技术。

所谓掺杂，就是在本征半导体中掺入微量的其他元素，这将使掺杂后半导体的导电性能大大增强，从而改变半导体的导电能力和导电类型。这种掺入微量杂质元素的半导体称为**杂质半导体**。一般掺入的杂质元素的浓度要远大于本征载流子浓度，又要远小于半导体材料本身的原子浓度，这样不会影响原有的半导体晶体结构，且能使杂质原子零星地分布在半导体

材料的晶格中。

根据掺入的是五价杂质元素，还是三价杂质元素，可以得到 N 型和 P 型两种类型的杂质半导体。

1. N 型半导体

在硅元素制成的本征半导体中掺入比例很小的磷元素（或其他五价元素），原有的晶体结构基本保持不变，只是磷原子（P）取代了某些位置上的硅原子（Si）。磷原子最外层有 5 个价电子，只需要 4 个价电子参与构成共价键，多余的第 5 个价电子很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，磷原子由于失去一个电子而成为不能移动的正离子。这样，半导体中的自由电子数目随着杂质磷元素的掺入而大量增多，自由电子的浓度远远大于空穴的浓度，故自由电子称为**多数载流子（Majority Carrier）**，简称**多子**；由于热激发而形成的空穴为**少数载流子（Minority Carrier）**，简称**少子**；自由电子导电成为这种杂质半导体的主要导电方式，导电时以电子电流为主，因此，这种半导体称为**N 型半导体或电子型半导体（N-Type semiconductor）**，如图 1-5 所示。

2. P 型半导体

如果在本征半导体中掺入比例很小的硼元素（或其他三价元素），由于硼原子（B）最外层只有 3 个价电子，硼原子在与周围 4 个硅原子形成共价键时，就因缺少一个价电子而产生一个空穴，相邻原子中的价电子很容易过来填补这个空穴，空穴就转移到相邻的原子中，硼原子由于得到一个电子而成为不能移动的负离子。每一个硼原子都能提供一个空穴，而在半导体中形成了大量的空穴，这种以空穴作为主要导电方式的杂质半导体，称为**P 型半导体或空穴型半导体（P-Type semiconductor）**，如图 1-6 所示。其中，空穴为多数载流子，导电时空穴电流为主。由于热激发而形成的自由电子为少数载流子。

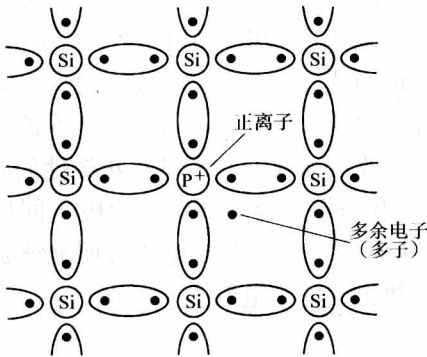


图 1-5 N 型半导体或电子型半导体

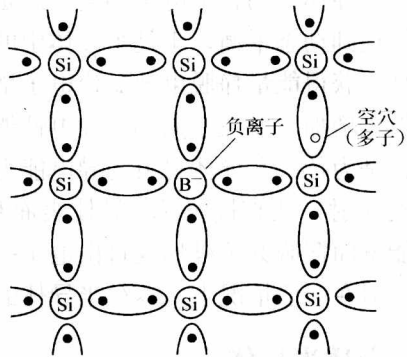


图 1-6 P 型半导体或空穴型半导体

在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要取决于掺杂浓度，可以通过控制掺杂浓度来改变半导体的导电能力。由于热激发形成的少数载流子浓度则随着温度的升高和光照的增强而增大。

无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，都是在电中性的本征半导体中掺入电中性的杂质元素形成的，虽然它们都有一种载流子数量大大增多，但是，N 型半导体中的自由电子数等于空穴数与正离子数之和，P 型半导体中的空穴数等于自由电子数与负离子数之和，因此，杂质半导体也是电中性的，整个杂质半导体对外不显电性。

1.1.3 PN 结的形成及其单向导电性

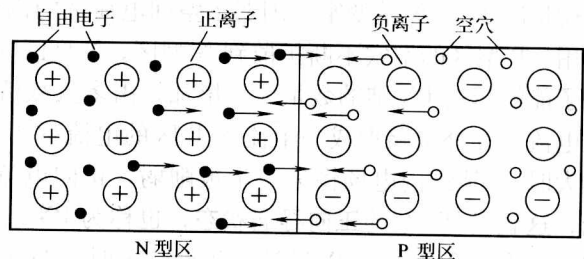
1. PN 结的形成

在同一块本征半导体晶片上，采用不同的掺杂工艺，使相邻区域分别形成 N 型半导体和 P 型半导体，则在它们的交界面就形成一个特殊的薄层，称为 **PN 结 (PN-Junction)**。PN 结是构成各种半导体器件的核心基础。

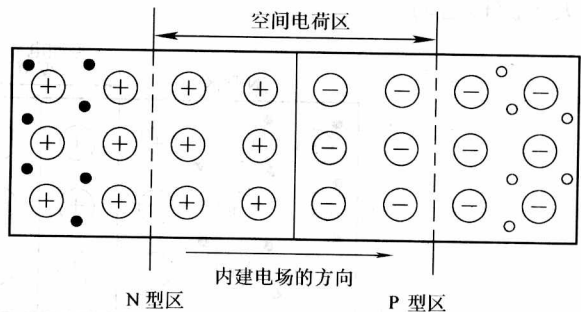
由于 P 型区是以空穴为多数载流子的，N 型区是以自由电子为多数载流子的，在两区的交界面存在着自由电子和空穴的浓度差异，因此 P 型区的空穴将由浓度高的 P 区向浓度低的 N 型区做有规则的运动，同时，N 型区的自由电子也要由浓度高的 N 区向浓度低的 P 型区做定向运动。这种多数载流子由于浓度差异而引起的定向运动称为**扩散运动**，浓度差越大，则扩散运动进行得越剧烈。随着这种扩散运动的进行，P 型区靠近边界处的区域只剩下

带负电的硼离子，形成一个带负电荷的区域。N 型区靠近边界处的区域只剩下带正电的磷离子，形成一个带正电荷的区域。由于硼离子和磷离子都固定在晶体结构中不能移动，所以在 PN 交界面处形成的正负电荷区称为**空间电荷区**。

空间电荷区中的电荷会形成一个由 N 型区指向 P 型区的电场，这个电场是由于载流子的扩散运动在半导体内部形成的，并不是由外加电压产生的，故称为**内建电场**，N 型区和 P 型区中载流子的运动如图 1-7a 所示。空间电荷区中正负电荷的数量会随着载流子的扩散逐渐增多，所以内建电场会由小到大逐渐增强。而内建电场的出现，将对载流子的运动产生两方面的影响。一方面，N 型区的自由电子和 P 型区的空穴在扩散穿越空间电荷区时，要克服电场力做功，



a) N 型区和 P 型区中载流子的运动



b) 动态平衡状态下的 PN 结

图 1-7 PN 结的形成

这就使得扩散到对方的多数载流子的数量减少，即内建电场对于两边区域的多数载流子的扩散运动是一个阻力场（或减速场），使扩散运动受到阻挡。另一方面，内建电场对于两边区域的少数载流子的运动却是一个加速场。N 型区带正电荷的空穴在电场力的作用下，将顺着电场方向运动，P 型区带负电荷的自由电子在电场力的作用下逆着电场方向运动，这种载流子在电场作用下做的定向运动称为**漂移运动**。少数载流子只要因热运动进入内建电场的势力范围，就会在电场力的作用下加速漂移到达对方。在刚开始形成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势。在扩散运动进行过程中，空间电荷区逐渐加宽，内建电场逐步增强。在一定温度下，多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后，P 型区的多数载流子空穴扩散到 N 型区的数量等于 N 型区的少数载流子空穴漂移到 P 型区的数量，自由电子也是这样。这时，扩散和漂移这两种运动就达到**动态平衡状态**，如图 1-7b 所

示。空间电荷区的电荷数量不再变化，电荷区宽度基本稳定下来，这时就形成 PN 结。

形成空间电荷区的正、负离子虽然也带电，但是它们不能移动，不参与导电，而在这区域中能够移动的带电粒子（自由电子和空穴）都扩散到对方区域复合掉了，或者说载流子都消耗尽了，所以空间电荷区也叫做耗尽区，其电阻率很高。

2. PN 结的单向导电性

PN 结在没有外加电场时，半导体中的扩散运动和漂移运动处于动态平衡。但在外加电场的作用下，PN 结只允许通过单向电流，具有单向导电性（**Current Amplifier**）。

P 型区接外电源的正极端，N 型区接外电源的负极端，电源所产生的外加电场与内建电场方向相反，这样的接法称为**正向连接**。在外加电场的作用下，扩散运动和漂移运动的动态平衡被破坏，P 型区的多子空穴进入空间电荷区，抵消了部分硼离子所带的负电荷，N 型区的多子自由电子向空间电荷区移动，抵消了部分磷离子所带的正电荷，空间电荷区中的正负电荷量减少，PN 结变窄，削弱了空间电荷区的内建电场，减小了对多数载流子扩散的阻碍作用。P 型区的空穴不断扩散到 N 型区，N 型区的自由电子不断扩散到 P 型区，两边多数载流子能够越过 PN 结的数量大大增加，由多数载流子的扩散运动形成 PN 结内较大的正向扩散电流，在外电路形成一个流入 P 区的电流称为**正向电流**。在一定范围内，外加电压稍有增大时，PN 结内电场将进一步被削弱，正向电流还将随之显著增加，PN 结呈现的电阻很低，这就是 PN 结的**正向导通状态**，也称为**PN 结正向偏置（Forward Bias）**，简称**PN 结正偏**，如图 1-8 所示。PN 结处于正偏状态时，两端的电压降称为正向偏置电压，这时扩散运动大于漂移运动。

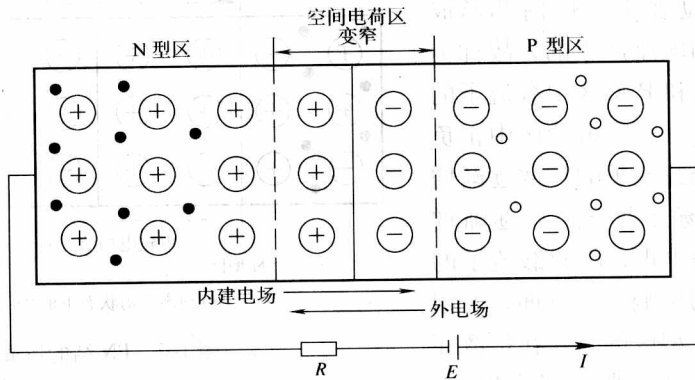


图 1-8 PN 结的正向导通状态

若将外加电源的负极端接 P 型区，外电源的正极端接 N 型区，这样的接法称为**反向连接**。电源所产生的外加电场与内建电场方向相同，使得 PN 结内的总电场大大加强，也破坏了扩散运动和漂移运动的动态平衡。P 型区的空穴和 N 型区的自由电子将离开 PN 结，PN 结变宽。外加电场与内建电场叠加在一起，一方面将使 P 型区和 N 型区多数载流子的扩散变得极为困难，扩散电流趋近于零。另一方面有利于 P 区和 N 区的少数载流子的漂移运动，PN 结中的电流就是少子的漂移电流。在外电路出现一个流入 N 区的**反向电流**。在常温下，由于少数载流子的数量很少，反向电流不大，一般为微安数量级以下，PN 结呈现的反向电阻很高，这就是 PN 结的**反向截止状态**，也称为**PN 结反向偏置（Backward Bias）**，简称**PN**

结反偏，如图 1-9 所示。PN 结处于反偏状态时，两端的压降称为反向偏置电压，这时漂移运动大于扩散运动。反向电流与反向电压的大小关系不大，当反向电压增大时，反向电流基本上保持恒定。所以又将反向电流叫做反向饱和电流。由于半导体中少数载流子是由热激发产生的，当环境温度升高时，热激发的程度加大，少数载流子的浓度增大，反向电流变大。所以，环境温度对反向电流的影响很大。

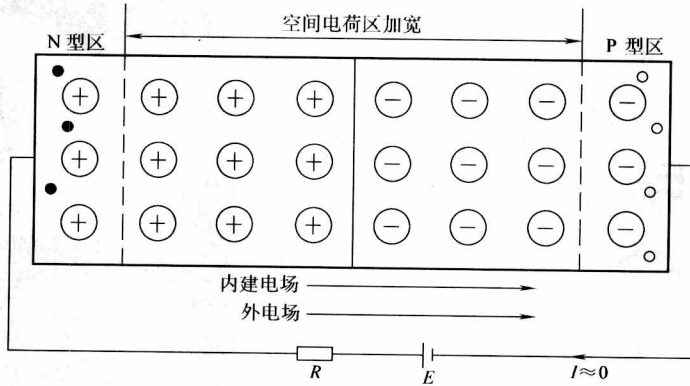


图 1-9 PN 结的反向截止状态

正向连接时，PN 结的正向压降较小，通过的正向电流大。反向连接时，PN 结两端的反向电压约等于外加电压，通过的反向电流极小。在一般情况下，可按反向电流等于零处理。所以，PN 结具有只允许正向电流通过，不允许反向电流通过的特性，这就是 PN 结的单向导电性。

此外，PN 结上电压大小变化时，PN 结内储存的电荷量也随之发生变化，这种电荷数量随外加电压而变的特点，说明 PN 结还具有一定的电容效应，称为结电容。结电容的大小与 PN 结本身的结构和工艺有关，结电容的电容量较小，一般为几微法到几百微法。在低频工作时，可以忽略结电容的影响，但在工作频率较高的场合则必须考虑其影响，选择结电容小的管子，否则将失去单向导电性。PN 结的反向饱和电流越小，结电容越小，则其单向导电性就越好。

【思考与练习】

- 1.1.1 本征半导体具有哪几种载流子？它们是怎样形成的？
- 1.1.2 N 型半导体中哪种载流子为多数载流子？P 型半导体中哪种载流子为多数载流子？N 型半导体是否带负电？P 型半导体是否带正电？为什么？
- 1.1.3 PN 结是怎样形成的？它具有怎样的特性？

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的基本结构

在 PN 结两端加上引线作电极，用不透光的金属、塑料、玻璃等材料做管壳，封装起来，就可以制成半导体二极管 (Diode)，简称二极管。P 型区一侧引出的电极称为阳极 (Anode)，也叫正极；N 型区一侧引出的电极称为阴极 (Cathode)，也叫负极。

按封装形式二极管可分为塑封管、金封管和玻璃封装等。图 1-10 所示为几种常见的二极管封装实物图例。其封装外形主要有如图 1-10a 所示的直插式 (SMD)、图 1-10b 所示的贴片式 (DIP)、图 1-10c 所示的螺栓式以及图 1-10d 所示的平板式。

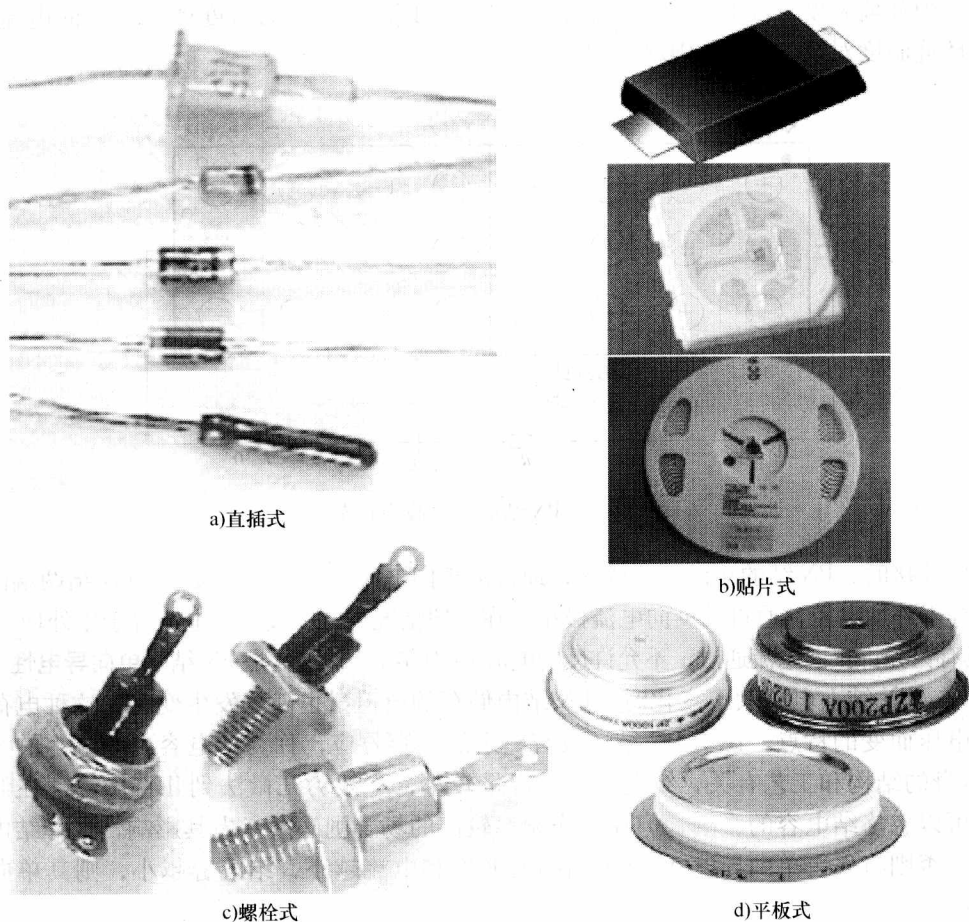


图 1-10 几种常见的二极管封装实物图例

在二极管外壳上除了印有其型号外,还标注出了引脚极性,有的是在外壳上印上二极管的符号,有的是在二极管的阴极一侧印一色圈(一般塑料封装印白色、玻璃封装印黑色)。

在无法辨认或不知其含义的情况下,还可以用万用表的欧姆档来判断引脚极性。

二极管有多种类型。按材料的不同分为锗二极管和硅二极管。按功能来分,有整流二极管、检波二极管、稳压二极管、发光二极管、开关二极管、光敏二极管、恒流二极管、变容二极管等。按 PN 结的不同结构形式,又可分为点接触型、面接触型和平面型等,二极管的结构分类及图形符号如图 1-11 所示。图 1-11a 所示的点接触型二极管,其 PN 结的结面积很小,不能流过较大的电流,但它的结电容也很小,适用于工作频率高的场合(可达几百兆赫)。例如收音机中的检波电路、脉冲数字电路中的开关元件,也可以作高频小电流整流。图 1-11b 所示的面接触型二极管,PN 结的结面积较大,能通过较大的电流(可达几千安),结电容也较大,最高工作频率较低,常应用在工频大电流整流电路。图 1-11c 所示的平面型二极管往往用于集成电路的制造工艺中,PN 结的面积可大可小,用于高频整流和开关电路

中，可用作大功率管。图 1-11d 所示为二极管的电路图形符号，VD 为二极管的文字符号。

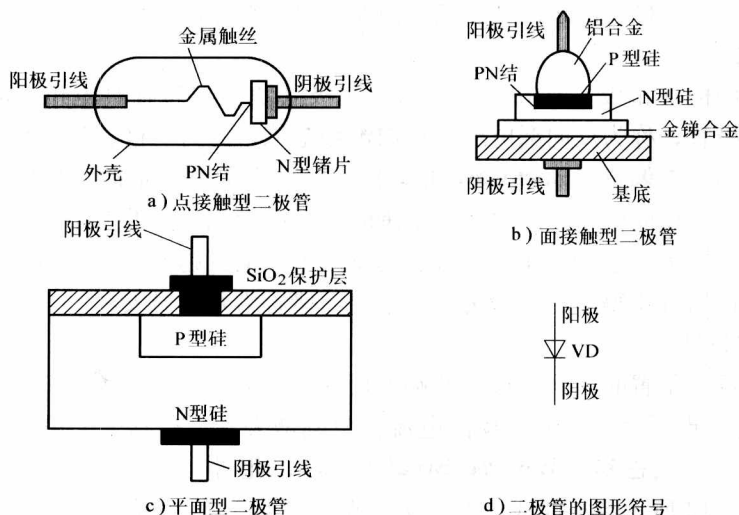


图 1-11 二极管的结构分类及图形符号

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

描述元器件电压与电流之间关系的特性称为伏安特性。由于半导体二极管（简称二极管）内是一个 PN 结，PN 结的伏安特性就是二极管的伏安特性，所以，二极管具有单向导电性。

不同类型的二极管参数不同，但通过观察测量二极管中的电流 i_D 随两端电压 u_D 的变化而变化情况，得到形状大致相同的二极管伏安特性曲线，如图 1-12 所示。由伏安特性曲线可知二极管是非线性元件，该曲线直观地反映出二极管具有单向导电性，其伏安特性可分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三部分。

1. 正向特性

将二极管的阳极（正极）接在高电位端，阴极（负极）接在低电位端，称为正向偏置（Forward Bias），形成正向伏安特性。

在正向特性的起始部分，因为外加的正向电压较小，外加电场不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，此时的正向电流十分微弱，几乎为零，PN 结呈现为一个大电阻，二极管不能导通。图 1-12 所示曲线中 OA 段（或 OA'）称为“死区”，A 点（或 A'点）的称为“死区电压”。硅管的死区电压约为 0.5V，锗管约为 0.1V。

当正向电压超过死区电压后，PN 结呈现很小的电阻，正向电流才明显地增大，二极管才能真正正向导通。正向导通后二极管两端的电压基本上保持不变（硅管约为 0.6~0.7V，锗管约为 0.2~0.3V），称为二极管的“正向导通压降”。图 1-12 所示特征曲线中 AB 段

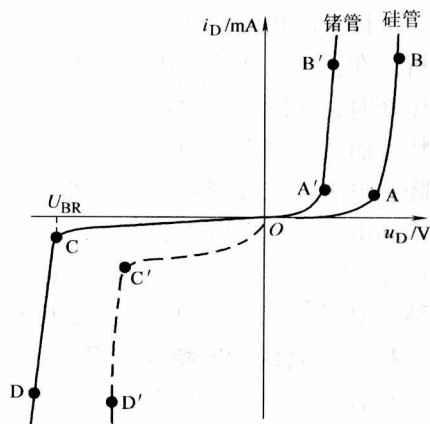


图 1-12 二极管的伏安特性曲线