

安徽省高等学校“十二五”省级规划教材

# 电工学

(下册)

主编◎刘国林 方潜生 副主编◎蒋 中 陈 杰 姬 敬

## 电子技术

DIANGONGXUE  
DIANZI JISHU



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

安徽省高等学校“十二五”省级规划教材

# 电工学

(下 册)

主编◎刘国林 方潜生 副主编◎蒋 中 陈 杰 姬 敬

---

## 电子技术

## 内 容 简 介

本书分上册(电工技术)和下册(电子技术)出版。下册内容包括半导体器件、基本放大电路、运算放大电路、直流稳压电源、电力电子技术、组合逻辑电路、时序逻辑电路、波形产生与变换、半导体存储器、模拟量与数字量的转换电路、电子测试等。本书采用国际电工词汇(IEV)和图形符号,每章选用的例题和实验大部分来自实际工程,有利于激发读者的学习兴趣,了解电工学在其他学科方面的应用。本书配备的电子教案内容丰富、直观生动,有助于读者在较短时间内理解并掌握书中内容。

本书概念准确,内容新颖,讲解深入浅出,语言流畅,可读性强,既注重基本原理必要的讲解,又突出工程上的实用性。本书可作为高等院校非电类专业电工学的教材,亦可作为普通高等职业非电类专业电工学的教材(标以“△”“\*”号除外),还可供工程技术人员自学及备考注册电气工程师执业资格考试的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工学·下册,电子技术/刘国林,方潜生主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2015.8  
ISBN 978-7-5650-2398-9

I. ①电… II. ①刘…②方… III. ①电工学—高等学校—教材②电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 204031 号

## 电 工 学 (下 册) 电 子 技 术

刘国林 方潜生 主编

责任编辑 权 怡 陈淮民

出 版 合肥工业大学出版社  
地 址 合肥市屯溪路 193 号  
邮 编 230009  
电 话 编校中心:0551-62903210  
市场营销部:0551-62903198  
网 址 www.hfutpress.com.cn  
E-mail hfutpress@163.com

版 次 2015 年 8 月第 1 版  
印 次 2015 年 10 月第 1 次印刷  
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16  
印 张 25  
字 数 593 千字  
印 刷 合肥星光印务有限责任公司  
发 行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-2398-9

定价:45.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

# 前 言

本书以2004年8月教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会修订的《电工学教学基本要求》为基础,精选经典内容,适当增加新知识、新技术、新成果等内容,强调电气设备和工程安全,使本书成为适应工程教育需要的《电工学》教材。本书主要有以下特色:

## 1. 精选内容

介绍电工电子技术的基本概念、基本理论、基本分析和计算方法。在阐明物理概念和基本定律的前提下,采用工程近似方法进行计算,略去一些不必要的数学推导。例如把变压器、电动机等作为一个元件,侧重介绍它们的外特性。

## 2. 推陈出新

本书所讲述的内容,大多是近十年来国内外工程中广泛采用的新技术、新工艺以及绿色新材料、新设备等,力图反映20世纪90年代以来国内外工程界与学术界在电工学方面所取得的最新成果,学以致用。

(1)20世纪50年代,由于我国铜材紧张,变压器的绕组用铝线,变压器原边大多采用星形联结。80年代以来,变压器的绕组改用铜线,变压器原边大多采用三角形联结。90年代以来,变压器导磁材料采用非晶合金,铁心无接缝一次卷绕,芯柱呈纯圆形,磁路最短、磁阻涡流损耗最小,它的空载损耗值与同容量的硅钢片变压器相比,可降低75%。而且配电变压器联结组别推荐采用Dyn11,降低了三次及三次以上的高次谐波激磁电流。配电变压器嵌装传感器和加装智能终端,可实现远距离检测其参数。

(2)异步电动机的启动和调速,除了介绍传统的降压启动方式(如Y- $\Delta$ 换接、自耦变压器启动等)和变极调速等外,还增加了变频调速(VVVF)等新技术。

(3)随着电子技术、计算机技术和通信技术等与传统电器的多学科交叉和融合,我国自20世纪90年代开始淘汰第一代低压电器产品,限制使用第二代产品,并逐步采用第三代产品。第三代产品具有模块化、智能化和网络化的特点,可直接与计算机组成监控系统。

(4)用信息技术改造传统工业,推进机电一体化,提高信息采集、传输和利用的能力,是我国加快实现工业化和现代化的必然选择。本书有机地结合了电工电子设备和电气控制系统,介绍了数据通信、计算机网络、现场总线控制系统以及Modbus协议等基本知识。

(5)反映近代电力电子技术的发展,例如绝缘门极双极型晶体管以及变流电路等内容。

(6)液态晶体显示器比其他显示器功耗低,无辐射、无闪烁,节能、环保,应用范围广泛。

(7)电荷耦合器件(CCD)将MOS光敏单元阵列和读出移位寄存器集成为一体,构成具有自扫描功能的图像传感器,在检测装置中得到广泛的应用。

(8)非电量测试在现代工业中显得越来越重要,本书从系统的基本组成出发,介绍了传感器、信号处理和信号输出等单元电路。

## 3. 强调安全

本书按照现行的国家标准规范和国际电工委员会(IEC)有关标准,强调在制造电工、电



于设备时要以人为本,在工程设计和施工中,应保证人身安全。

(1)在多数场合,低压配电系统采用中性点直接接地方式即 TN 系统,当控制回路发生接地故障时,应避免保护和控制被大地短路,造成电动机意外启动或不能停车。因此,《通用用电设备配电设计规范》GB 50055 规定,电动机一般在控制回路中应装隔离电器(用于安全检修)和短路保护电器。控制电压采用 220V,不宜采用 380V。电气控制图按工程施工图常规画法,让学生在理论学习的同时能熟悉一些工程施工图。

(2)在三相四线制供电系统中,中性线必须连接牢固,不允许单独串接熔断器或装断路器(开关)。

#### 4. 突出应用

本书所选的例题,大部分来自工程实际。这有助于读者阅读电工电子线路图,设计电工电子工程方案,绘制电工电子施工图,查阅电工产品手册(资料),掌握按照不同材料的性能指标和施工工艺进行施工的方法,熟练使用测试仪器仪表,从而提高学生的实际工作技能。

#### 5. 学习基本理论和标准相结合

标准是衡量事物的准则。本书力求把现行的国家标准规范和 IEC 有关标准有机地结合到相应章节之中,帮助学生在理论学习的同时,了解电工、电子领域的标准及应用,学会查阅这些标准,为继续学习与本专业有关的工程技术、从事与本专业有关的科学研究打下一定的基础。

#### 6. 以学生为中心

制作多媒体教案,把教师从技术基础课呆板的课堂教学中解放出来,帮助学生理解、消化理论知识,激发学生的学习积极性与创新意识。通过多媒体教学及实训,让师生有机地结合,做到教学互动,给技术基础课的教学注入新的活力。

本书适用于“电工学(电子技术)”课程 32~64 学时的讲课。由于各专业对电工学的要求不一,为了使本书具有灵活性,将本书内容分为三类:

(1)基本内容,应使学生深入领会和掌握,并能熟练运用。书中概念、理论用“理解”一词表述,方法、运算用“掌握”一词表述。基本教学计划为 32 学时。

(2)非共同性基本内容(标以“△”号),也是必不可少的,只是在教学要求上低于前者。书中概念、理论用“了解”一词表述,方法、运算用“会”或“了解”表述。视学时的多少和学生的实际情况由教师选讲。

(3)参考内容(标以“\*”号)是加深、加宽内容,为拓宽学生的视野,可在教师指导下让学生通过自学掌握,不必全在课堂讲授。

与本书相配套的“学习辅导与习题解答”以及更新内容和工程实例,读者可以向 liu5100340@126.com 索取或采用 QQ:3013122772 交流。

本书由多年从事电工学教学的教师以及科研人员、设计人员和施工人员集体讨论编写大纲,吸取了相关教材好的编写经验。本书主编为刘国林、方潜生,副主编为蒋中、陈杰、姬敬,参编为赵为松、纪明伟、汪萍、石云、郑禹、李彬彬、蒋瑾、赵静、司伟、林新国、张红梅、金烨、卢林、田飞、刘祥宇等,汪瑞玲、汪芮、刘祥宇等参加文字录入和部分绘图。安徽大学电气工程与自动化学院教授、博士生导师赵吉文等提出了许多中肯意见和修改意见,在此,我们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,殷切期望使用本书的读者给予批评指正。

编著者

2015 年 8 月

# 目 录

## 下册 电子技术

第 13 章 半导体器件 .....	(1)
13.1 半导体的导电特性 .....	(1)
△13.1.1 本征半导体 .....	(1)
△13.1.2 N 型半导体和 P 型半导体 .....	(3)
13.1.3 PN 结及其单向导电性 .....	(4)
13.2 二极管 .....	(6)
13.2.1 普通二极管 .....	(6)
13.2.2 稳压二极管 .....	(8)
13.3 三极管 .....	(10)
13.3.1 三极管的基本结构 .....	(10)
13.3.2 三极管的工作原理 .....	(11)
13.3.3 三极管的特性曲线 .....	(12)
13.3.4 三极管的主要参数 .....	(14)
△13.4 场效应晶体管 .....	(16)
13.4.1 绝缘栅场效应管的基本结构 .....	(16)
13.4.2 绝缘栅场效应管的基本工作原理 .....	(17)
13.4.3 绝缘栅场效应管的特性曲线 .....	(17)
13.4.4 场效应晶体管的主要参数 .....	(19)
* 13.5 光电器件 .....	(20)
13.5.1 光电二极管 .....	(20)
13.5.2 光电耦合电路 .....	(22)

13.5.3	光电晶体管 .....	(23)
	练习题 .....	(24)
<b>第 14 章</b>	<b>基本放大电路 .....</b>	<b>(29)</b>
14.1	共发射极放大电路 .....	(29)
14.1.1	共发射极放大电路的基本结构 .....	(29)
14.1.2	静态分析 .....	(31)
14.1.3	动态分析 .....	(33)
14.1.4	静态工作点的稳定 .....	(41)
14.1.5	放大电路的频率响应 .....	(43)
△14.2	共集电极放大电路 .....	(44)
14.2.1	电路的基本结构 .....	(45)
14.2.2	电路的静态分析 .....	(45)
14.2.3	电路的动态分析 .....	(45)
* 14.3	共基极放大电路 .....	(47)
14.3.1	电路的基本结构 .....	(47)
14.3.2	静态分析 .....	(47)
14.3.3	动态分析 .....	(48)
14.4	三极管基本放大电路的派生电路 .....	(50)
△14.4.1	复合管的组成及其电流放大系数 .....	(50)
* 14.4.2	复合管放大电路 .....	(51)
△14.5	场效应管放大电路 .....	(52)
14.5.1	电路的静态分析 .....	(52)
14.5.2	电路的动态分析 .....	(53)
△14.6	多级放大电路 .....	(56)
14.6.1	多级放大电路耦合方式 .....	(56)
14.6.2	多级放大电路分析 .....	(57)
14.7	差分放大电路 .....	(59)
14.7.1	电路的基本结构 .....	(59)
14.7.2	电路分析 .....	(59)
* 14.7.3	恒流源 .....	(62)

14.8	功率放大电路	(63)
14.8.1	功率放大电路的工作状态	(64)
14.8.2	互补对称放大电路	(65)
△14.8.3	集成功率放大电路	(66)
	练习题	(67)
<b>第 15 章</b>	<b>集成运算放大电路</b>	<b>(74)</b>
15.1	运算放大器的基本概念	(74)
15.1.1	运算放大器的组成	(74)
15.1.2	集成运算放大器的主要技术参数	(75)
15.1.3	集成运算放大器分析方法	(77)
△15.1.4	集成运算放大器的典型电路	(79)
15.2	放大电路的反馈	(81)
15.2.1	反馈的基本概念	(82)
15.2.2	电路反馈的判断	(83)
△15.2.3	负反馈对放大电路性能的影响	(89)
15.3	基本运算电路	(95)
15.3.1	比例运算电路	(95)
15.3.2	加法运算电路	(97)
△15.3.3	减法运算电路	(98)
15.3.4	积分运算电路	(100)
*15.3.5	微分运算电路	(103)
15.4	电压比较电路	(106)
15.4.1	单限电压比较器	(106)
△15.4.2	滞回电压比较器	(108)
△15.5	有源滤波器	(109)
15.5.1	有源低通滤波器	(109)
15.5.2	有源高通滤波器	(110)
△15.6	使用运算放大器应注意的问题	(112)
15.6.1	选用元件	(112)
15.6.2	消振	(112)



15.6.3	调零	(112)
15.6.4	保护	(112)
	练习题	(114)
<b>第 16 章</b>	<b>直流稳压电源</b>	<b>(123)</b>
16.1	整流电路	(123)
16.2	滤波电路	(125)
16.2.1	电容滤波电路	(125)
16.2.2	电感电容滤波电路	(127)
16.3	直流稳压电源	(128)
16.3.1	串联型直流稳压电路	(128)
△16.3.2	集成稳压器	(129)
* 16.3.3	开关稳压电路	(132)
△16.3.4	直流稳压电路的质量指标	(133)
* 16.4	同步整流	(134)
16.4.1	同步整流管	(135)
16.4.2	同步整流工作原理	(135)
	练习题	(136)
<b>第 17 章</b>	<b>电力电子技术</b>	<b>(140)</b>
17.1	电力电子器件	(140)
17.1.1	晶闸管	(140)
△17.1.2	绝缘栅双极型晶体管	(146)
* 17.1.3	功率模块	(151)
17.2	电力电子器件的驱动电路	(153)
17.2.1	晶闸管的触发电路	(153)
△17.2.2	绝缘栅双极型晶体管的驱动电路	(157)
△17.3	电力电子器件的保护电路	(158)
17.3.1	过电压保护	(158)
17.3.2	过电流保护	(159)
17.3.3	缓冲电路	(159)

17.4	可控整流电路 .....	(161)
17.4.1	单相桥式可控整流电路 .....	(161)
17.4.2	单相桥式半控整流电路 .....	(163)
△17.5	调压电路 .....	(164)
17.5.1	交流调压电路 .....	(164)
17.5.2	直流调压电路 .....	(165)
△17.6	逆变电路 .....	(167)
17.6.1	单相逆变电路 .....	(167)
17.6.2	三相变频调速电路 .....	(169)
17.6.3	不间断电源的逆变电路 .....	(169)
*17.7	整流电路的谐波和功率因数 .....	(173)
17.7.1	失真的产生 .....	(173)
17.7.2	谐波电流的危害 .....	(173)
17.7.3	谐波电流的限制 .....	(173)
17.7.4	功率因数 .....	(174)
	练习题 .....	(176)
<b>第18章</b>	<b>组合逻辑电路 .....</b>	<b>(180)</b>
18.1	脉冲信号 .....	(180)
18.2	基本门电路 .....	(182)
18.2.1	逻辑门电路的基本概念 .....	(182)
18.2.2	分立元件门电路 .....	(183)
18.2.3	基本逻辑门电路的组合 .....	(186)
18.3	集成门电路 .....	(189)
18.3.1	TTL 门电路 .....	(189)
18.3.2	CMOS 门电路 .....	(195)
△18.3.3	门电路的连接 .....	(198)
18.4	逻辑代数 .....	(201)
18.4.1	逻辑代数运算法则 .....	(201)
△18.4.2	逻辑代数的表示方法 .....	(203)
△18.4.3	逻辑函数的代数化简法 .....	(204)

18.5	组合逻辑电路的分析与设计 .....	(209)
18.5.1	组合逻辑电路分析 .....	(209)
18.5.2	组合逻辑电路设计 .....	(211)
18.6	加法器 .....	(215)
18.6.1	数制 .....	(215)
18.6.2	半加器 .....	(216)
18.6.3	全加器 .....	(217)
18.7	编码器 .....	(219)
18.7.1	普通编码器 .....	(219)
△18.7.2	优先编码器 .....	(221)
18.8	译码器和数字显示 .....	(222)
18.8.1	二进制译码器 .....	(222)
18.8.2	数字显示 .....	(225)
* 18.9	数据选择与分配 .....	(229)
18.9.1	数据选择器 .....	(229)
18.9.2	数据分配器 .....	(231)
	练习题 .....	(231)
<b>第 19 章</b>	<b>时序逻辑电路 .....</b>	<b>(243)</b>
19.1	触发器 .....	(243)
19.1.1	RS 触发器 .....	(243)
19.1.2	JK 触发器 .....	(247)
19.1.3	D 触发器 .....	(251)
19.2	时序逻辑电路分析 .....	(255)
19.3	寄存器 .....	(259)
19.3.1	数码寄存器 .....	(259)
19.3.2	移位寄存器 .....	(260)
* 19.3.3	寄存器应用 .....	(263)
19.4	计数器 .....	(267)
19.4.1	同步计数器 .....	(267)
△19.4.2	异步计数器 .....	(273)
* 19.4.3	移位寄存型计数器 .....	(279)
	练习题 .....	(284)

第 20 章 波形产生和变换 .....	(292)
20.1 正弦波振荡电路 .....	(292)
20.1.1 正弦波振荡电路的基本原理 .....	(292)
20.1.2 RC 正弦波振荡电路 .....	(293)
△20.1.3 LC 正弦波振荡电路 .....	(294)
20.2 多谐振荡器 .....	(298)
△20.2.1 用石英晶体构成的多谐振荡器 .....	(298)
* 20.2.2 用集成运放构成的多谐振荡器 .....	(301)
* 20.2.3 用 555 集成定时器构成的多谐振荡器 .....	(303)
20.3 单稳态触发器和施密特触发器 .....	(306)
△20.3.1 用 555 集成定时器构成的单稳态触发器 .....	(306)
* 20.3.2 用 555 集成定时器构成的施密特触发器 .....	(309)
练习题 .....	(312)
第 21 章 半导体存储器 .....	(316)
△21.1 只读存储器 .....	(316)
21.1.1 只读存储器的结构 .....	(316)
21.1.2 只读存储器的工作原理 .....	(317)
21.1.3 ROM 的阵列图 .....	(319)
21.1.4 存储器主要技术参数 .....	(320)
* 21.2 随机存取存储器 .....	(322)
21.2.1 基本存储单元 .....	(322)
21.2.2 RAM 的基本结构 .....	(322)
21.2.3 RAM 容量的扩展 .....	(324)
* 21.3 可编程逻辑器件 .....	(326)
21.3.1 可编程逻辑器件的结构 .....	(326)
21.3.2 可编程只读存储器 .....	(328)
21.3.3 可编程阵列逻辑 .....	(331)
21.3.4 通用阵列逻辑 .....	(331)
练习题 .....	(334)
第 22 章 模拟量与数字量的转换电路 .....	(337)
△22.1 数模转换电路 .....	(337)
22.1.1 D/A 转换器的工作原理 .....	(337)
22.1.2 D/A 转换器的主要技术指标 .....	(340)
22.2 模数转换电路 .....	(342)

△22.2.1	A/D 转换的基本原理 .....	(342)
△22.2.2	逐次逼近型 A/D 转换器 .....	(345)
* 22.2.3	积分型 A/D 转换电路 .....	(349)
△22.2.4	A/D 转换器的主要技术指标 .....	(353)
	练习题 .....	(354)
<b>第 23 章</b>	<b>电子测试</b> .....	<b>(357)</b>
△23.1	非电量测试系统 .....	(357)
23.1.1	非电量测试系统的组成 .....	(357)
23.1.2	被测信号获取 .....	(357)
23.1.3	信号处理 .....	(361)
23.1.4	信号输出 .....	(364)
23.1.5	检测仪表的检定 .....	(364)
* 23.2	电子式电能表 .....	(365)
23.2.1	电子式电能表概述 .....	(365)
23.2.2	电子式电能表的基本结构 .....	(366)
	练习题 .....	(368)
<b>部分习题答案</b>	.....	<b>(371)</b>
<b>附录 A</b>	<b>半导体分立器件型号命名方法</b> .....	<b>(385)</b>
<b>附录 B</b>	<b>半导体集成电路型号命名方法</b> .....	<b>(386)</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>(387)</b>

# 第 13 章 半导体器件

半导体二极管和三极管是电子技术中最基本的半导体器件。它们的基本结构、工作原理和特性是我们学习电子技术和分析电子电路的基础。而半导体的导电特性和 PN 结的基本原理,又是人们了解半导体二极管和三极管的基础。因此,本章首先简要地介绍半导体的导电特性和 PN 结的基本原理,然后介绍半导体二极管、三极管和金属氧化物半导体场效应晶体管的结构、工作原理、特性曲线以及主要参数,最后介绍光电二极管、发光二极管和光电三极管等。

本章学习要求:(1)了解半导体的导电特性;(2)掌握半导体二极管、稳压二极管、三极管的工作原理和主要参数;(3)了解金属氧化物半导体场效应晶体管的工作原理和主要参数;(4)了解光电二极管、发光二极管和光电三极管的工作原理等。

## 13.1 半导体的导电特性

半导体器件是构成各种电子电路的基础。半导体的主要特性是什么呢?通常将导电能力介于导体和绝缘体之间的一大类物质,如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物等统称为半导体。

很多半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。例如钴、锰、镍等氧化物一类的半导体对温度的反应特别灵敏,环境温度升高时,它们的导电能力要增强很多,利用这种特性可做成各种热敏电阻。又如镉、铅等的硫化物与硒化物一类的半导体受到光照时,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,利用这种特性可做成各种光敏电阻。

在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后,它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。杂质半导体的奇妙之处在于,掺入不同性质、不同浓度的杂质,可以制造出种类繁多、用途各异的半导体器件。

### △ 13.1.1 本征半导体

最常用的半导体材料是锗和硅,它们各有四个价电子,都是四价元素,锗和硅的原子结构如图 13.1.1 所示。通过一定的工艺过程可以将半导体提纯,制成晶体(例如单晶硅)。完全纯净的、具有晶体结构的半导体为本征半导体。



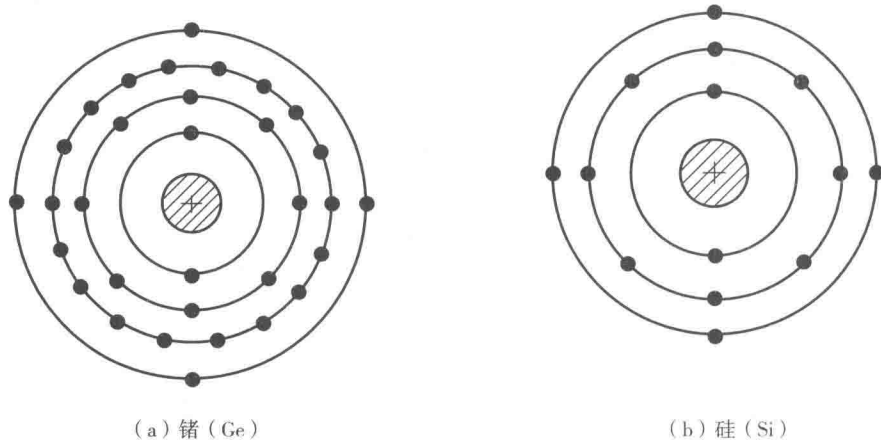


图 13.1.1 半导体的原子结构

在本征半导体的晶体结构中，每一个原子与相邻的 4 个原子结合。每一个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成一个电子对。也就是说，两个相邻原子共有一对价电子，这对价电子构成所谓的共价键，如图 13.1.2 所示。

在本征半导体中，由于共价键的结合力很强，在热力学温度为零度时，晶体中不存在能够导电的载流子，所以半导体不能导电。如果温度升高，少数价电子获得足够的能量，可挣脱原子核的束缚成为自由电子。但因自由电子的数量很少，所以本征半导体的导电能力非常微弱。在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，称为空穴。在外电场的作用下，有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子，填补这个空穴。同时，在附近的共价键中留下一个新的空穴，同样，它也可以由相邻原子中的价电子来递补，如图 13.1.3 所示。从效果上看，这种共有电子的填补运动，就好像是带正电荷的空穴在运动。

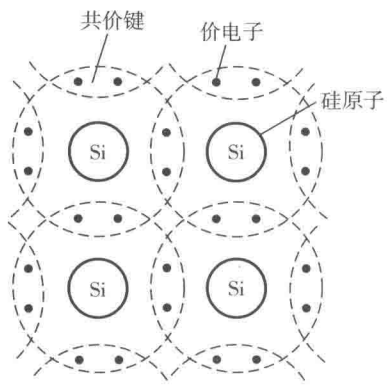


图 13.1.2 硅单晶中的共价键结构

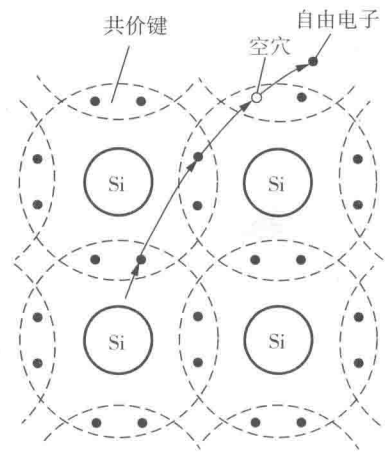


图 13.1.3 空穴和自由电子的形成

由此可见,半导体中存在自由电子和空穴两种载流子。自由电子带负电而空穴带正电。

在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现,同时又不断复合。在一定温度下,载流子的产生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)便维持一定数目。温度愈高,载流子数目愈多,导电性能也就愈好。所以,温度对半导体器件性能的影响很大。

### △ 13.1.2 N型半导体和P型半导体

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,导电能力仍然很低。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),这将使掺杂后的半导体(杂质半导体)的导电性能大大加强。

由于掺入的杂质不同,杂质半导体可分为两大类。

#### 1. N型半导体

在4价的硅或锗的晶体中掺入少量的5价元素,如磷、锑、砷等,则原来晶格中的一些硅原子被杂质原子取代。而每个杂质原子的最外层有5个价电子,如图13.1.4所示,它与周围4个硅原子组成共价键结构时只需4个价电子,多余的第5个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子,如图13.1.5所示。于是半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为N(或电子)型半导体。故在N型半导体中,自由电子称为多数载流子,而其中的空穴称为少数载流子。

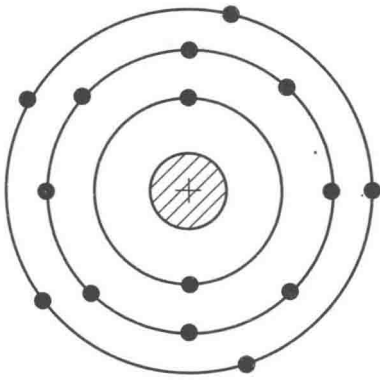


图 13.1.4 磷原子的结构

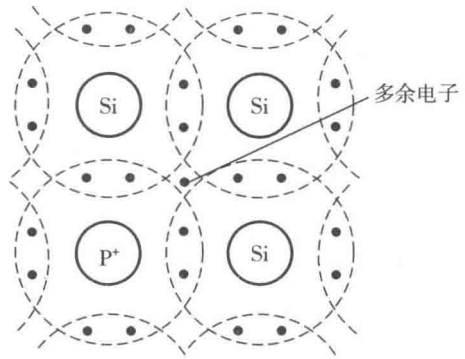


图 13.1.5 硅晶体中掺磷出现自由电子

#### 2. P型半导体

在4价的硅或锗晶体中掺入少量的3价元素,如硼、镓、铟等,由于杂质原子只有3个价电子,如图13.1.6所示,故在构成共价键结构时,将因缺少一个价电子而产生一个空位。当相邻原子中的价电子受到热的或其他的激发获得能量时,就有可能填补这个空位,而在该相邻原子中便出现一个空穴,如图13.1.7所示。每一个杂质原子都能提供一个空穴,于是在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为P(或空穴)型半导体,其中多数载流子是空穴,少数载流子是自由电子。

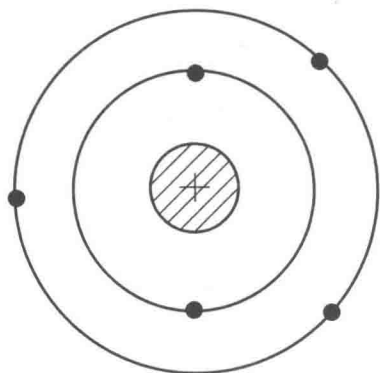


图 13.1.6 硼原子的结构

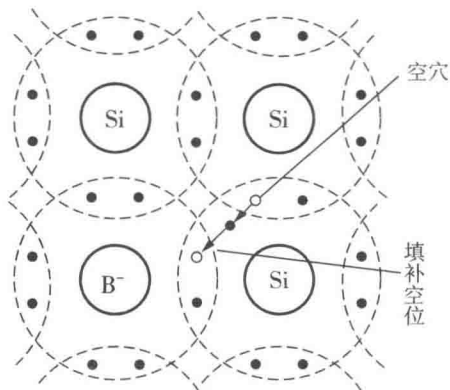


图 13.1.7 硅晶体中掺硼出现空穴

### 13.1.3 PN 结及其单向导电性

#### 1. PN 结

如果将一块半导体的一侧掺杂成为 P 型半导体，而另一侧掺杂成为 N 型半导体，则在二者的交界处将形成一个 PN 结，如图 13.1.8 所示。在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧，由于 P 区空穴和 N 区电子的浓度相差悬殊，所以 P 区中的多数载流子空穴要向 N 区扩散，同时 N 区的电子也要向 P 区扩散，如图 13.1.9(a) 所示（图中用实线箭头表示扩散运动方向）。

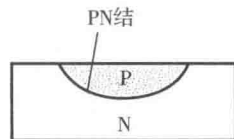


图 13.1.8 PN 结的构造

当电子和空穴相遇时，将发生复合而消失。于是，在交界面两侧形成一个不能移动的正、负离子组成的空间电荷区，也就是 PN 结，如图 13.1.9(b) 所示。这种因为浓度差而产生的运动称为扩散运动。正负空间电荷在交界面两侧形成内电场，内电场的方向由正空间电荷区指向负空间电荷区。内电场有阻碍扩散运动的作用，空间电荷区越宽，内电场越强，扩散运动就越弱。

扩散运动的同时还存在着漂移运动，即由于内电场的作用，P 区的少量电子会运动到 N 区，而 N 区的少量空穴也会运动到 P 区，如图 13.1.9(a) 所示（用虚线箭头表示漂移运动方向）。空间电荷区越宽，内电场就越强，漂移运动就越强。

扩散运动的结果使空间电荷区变宽，漂移运动的结果使空间电荷区变窄，这两个相反的运动最终达到动态平衡。这样，在交接面的两侧就形成了宽度固定的空间电荷区，如图 13.1.9(b) 所示，这个空间电荷区称为 PN 结。

#### 2. PN 结的单向导电性

(1) 如果在 PN 结上外加一个电压，其正极接 P 区，负极接 N 区，如图 13.1.10(a) 所示，则称为正向偏置。当 PN 结正向偏置时，由于外电场（直流电源产生的电场）与内电场方向相反，使空间电荷区变窄，内电场被削弱，因此多数载流子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流（即正向电流），这称为 PN 结正向导通。外电源  $U$  源源不断地提供电荷（正极提供空