



普通高等教育“十二五”规划教材



辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

电子技术简明教程 (第二版)

秦 宏 主 编

曲延华 张玉梅 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教..



辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

电子技术简明教程

(第二版)

主 编 秦 宏
副主编 曲延华 张玉梅
参 编 于 源
主 审 李晶皎



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材和辽宁省普通高等教育“十二五”省级规划教材。

本书根据非电类专业或电类少学时专业对电子技术基础知识的要求,在结构和内容上做了实用性处理,立足少而精,具有简明、易懂、实用、与实践密切结合的特点,使读者可以在较少的时间内,了解电子技术的基本面貌,掌握基本的电子知识与技能。

本书主体部分分模拟电子技术和数字电子技术两篇。主要内容包括绪论、基本半导体器件、常用放大电路单元、正弦信号产生电路、直流稳压电源、模拟电子电路应用实例、数字电子技术基础知识、数字逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、数字电子电路应用实例、模拟与数字系统的接口 11 个部分。为进一步使教材紧凑,将半导体的基本知识和模数接口电路分别处理为绪论和附篇,可根据需要取舍而不影响全书结构。

本书可作为高等学校非电类本科电子技术或电子学等课程的教材或教学参考书,也可供少学时的电类专业或其他工科专业选用,或供社会读者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术简明教程/秦宏主编. —2 版. —北京:中国电力出版社, 2015. 2

普通高等教育“十二五”规划教材 辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 7085 - 2

I. ①电… II. ①秦… III. ①电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 009164 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http://www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 10 月第一版

2015 年 2 月第二版 2015 年 2 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15. 25 印张 372 千字

定价 30. 00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

进入 21 世纪以来,电子技术高速发展,新器件、新知识、新技术层出不穷。对培养国家基本建设人才的高等学校来说,电子技术作为高等学校大多数工科专业的必修课程,地位也越来越重要。这促使电子技术课程体系、教材、教学方法都要随之发展,以适应时代的需要。在教材方面,电子、信息类的专业教材各具特色,但对于少学时的本科专业来说,教学实践中往往要么面面俱到却无法深入探究任何一个实际问题,要么大幅删减教学内容却丧失了对电子技术体系全貌的把握。因此,高等学校教学实践中迫切需要一本简明易懂、内容精练但又不失全貌、篇幅上合理、结构上逻辑性强、能与实践密切结合的针对高等学校少学时专业的电子技术教材。

本书根据高等学校非电类电子技术课程教学基本要求编写,主要内容是电子技术的基础理论、基本器件、常用实用电路等电子技术的相关知识内容。全书充分考虑高等学校工科少学时电子课程的特点,立足于少而精,将课程内容做了大胆整合,结构做了大胆调整,突出结构的逻辑性,语言的通俗性,使教材具有简明、易懂、实用,能与实践密切结合的特点,使学生可在较少的学时中了解电子技术的基本面貌,掌握精髓,具备基本的电子知识与技能。在 2010 年至今的使用过程中,本书的内容体系受到各方面的好评,因此,此次修订沿用了第一版的体例,仅对个别内容进行了调整,便于更好地教学。

本书的主要特点如下:

(1) 结构紧凑、突出主线。本书分为模拟电子技术和数字电子技术两篇。为进一步使教材结构紧凑,将半导体的基本知识和模数接口电路分别处理为绪论和附篇,可根据需要取舍而不影响全书结构。本书主要内容有绪论、基本半导体器件、常用放大电路单元、正弦信号产生电路、直流稳压电源、模拟电子电路应用实例、数字电子技术基础知识、数字逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、数字电子电路应用实例、模拟与数字系统的接口 11 个部分。

(2) 立足模块、综合应用。本书凝练电子技术课程的知识点,弱化大量的原理、推导等研究性问题,教材上篇模块包括基本半导体器件、常用放大电路单元、正弦信号产生电路、直流稳压电源四章,最后以模拟电子电路应用实例综合模拟电子技术部分的各知识点,加强理论知识与工程实际问题的联系,使学生在较少学时内具备综合应用的思维能力。

教材下篇模块包括数字电子技术基础知识、数字逻辑电路、脉冲信号的产生与整形三章,最后以数字电子电路应用实例综合数字电子技术部分各知识点,加强理论综合能力与实践应用能力。

全书最后通过附篇模数接口,将模拟、数字部分有机地联系为一个整体,并通过一个实用的多路测温系统实例,立足模块、综合应用,拓宽学生的知识面和眼界,使学生适应后续课程的学习与不同就业岗位的需要,达到“少学时、宽接口”的目的。

(3) 理论够用、取舍灵活(弃小细节、取大结构)。半导体的基本知识部分是整个电子技术的基础,但由于此部分内容涉及较多的微观半导体知识与理论,特别是对于非电类少学时专业来说,无论从课时容量上、后续专业课对本课程的要求上,都不一定是必选内容。从

模块化思维的角度来说, 弱化内部理论、强化外部应用是本教材的指导思想。同时, 为了使读者更好地掌握电子技术知识全貌, 本教材将半导体的基本知识编入绪论, 使用者可根据情况灵活取舍, 不影响全书结构。

本书还创新地采用了每章“自己做小结”的形式, 便于读者把握每个单元的基本概念和基本要求。每章配有习题并有一定比例的实践性较强的应用题型。书末还提供了试卷格式的综合测试题, 可以使读者更好地掌握本门课程的基本理论知识及实际应用技能。

本书的第2章的2.2节、2.3节以及第3、4章由曲延华编写, 第5章由于源编写, 第6章的6.1节、6.2节由张玉梅编写, 秦宏编写了其余章节并统稿。

由于编者尚处于少学时电子技术教材编写的探索阶段, 书中难免出现不妥和疏漏之处, 敬请读者提出宝贵意见。

编 者

2014年12月

本书符号说明

1 基本原则

1. 电流和电压的基本原则（以基极电流为例）

$I_{B(AV)}$	平均值
I_B (I_{BQ})	直流量或静态值（大写字母+大写下标）
i_B	可能包含直流及交流的瞬时总量（小写字母+大写下标）
i_b	交流瞬时值（小写字母+小写下标）
I_b	交流有效值（大写字母+小写下标）
$\dot{I}_b$	正弦交流信号的相量形式
ΔI_B	变化量

2. 下标的一般含义

各种符号均可以用基本符号+下标的形式表示更多的含义。如：s 代表信号源，i 代表输入，o 代表输出等，其他符号的下标均可依此方法表示。

i	输入
o	输出
f	反馈
s	信号源
H, L	高, 低
c, d	共模, 差模
F, R	正向, 反向
L	负载
REF	基准或参考电压
max, min	最大, 最小

2 基本符号

1. 电流和电压

I, i	电流的通用符号
U, u	电压的通用符号
V_{BB}, V_{CC}, V_{EE}	晶体三极管 BJT 的基极、集电极和发射极回路电源
V_{GG}, V_{DD}, V_{SS}	场效应管 FET 的栅极、漏极和源极回路电源
GND	地

2. 电阻、电导、电容和电感

R, r	直流电阻和交流电阻的通用符号
G, g	直流电导和交流电导的通用符号
C	电容的通用符号
L, M, T	电感、互感和变压器

3. 增益与放大倍数

A	放大倍数或增益的通用符号
A_u	电压放大倍数的通用符号
F	反馈网络的反馈系数
A_f	闭环增益
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_{od}	开环差模电压增益
A_{um}	中频电压放大倍数

4. 功率和效率

P	功率的通用符号
P_V	直流源供给的功率
P_T	管耗
η	效率的通用符号

5. 频率与周期

f	频率的通用符号
f_M	最高工作频率
T	交流电源或脉冲的周期
t_w	脉冲宽度
q	占空比

3 基本器件参数符号

1. 二极管

VD	二极管的通用符号
VZ	稳压二极管
a, k	阳极和阴极
I_F	最大整流电流（正向电流）
I_S	反向饱和电流
U_{th}	二极管和三极管的死区电压
U_{BR}	反向击穿电压
U_{RM}	最高反向工作电压
U_Z	稳压管的稳定电压

2. 三极管

VT	晶体三极管 BJT 的通用符号
b, c, e	基极、集电极和发射极
$\bar{\beta}, \beta$	晶体三极管共发射极直流电流放大系数和交流电流放大系数
I_{CBO}, I_{CEO}	三极管的极间反向电流
I_{ES}, I_{CS}	临界饱和基极电流和临界饱和集电极电流
U_{CES}	三极管饱和管压降

$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极与发射极间的反向击穿电压
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
r_{be}	三极管的交流输入电阻
3. 场效应管	
VT	场效应管 FET 的通用符号
g, d, s	栅极、漏极和源极
g_m	低频跨导
U_T, U_P	增强型场效应管的开启电压和耗尽型场效应管的夹断电压
I_{DSS}	耗尽型场效应管的漏极饱和电流
4. 其他模拟器件	
K_{CMR}	共模抑制比
U_{T+}, U_{T-}	迟滞比较器（施密特触发器）的正向和负向阈值电压
ΔU_T	迟滞比较器（施密特触发器）的回差电压
5. 数字逻辑电路	
G	逻辑门
N	扇出系数
t_{pd}	平均延迟时间
PD	延时-功耗积
E, EN, EI, EO 等	使能控制端
FF	触发器
Q, Q^n	触发器的现态
Q^{n+1}	触发器的次态
R, S	RS 触发器的输入端
CR, CLR, R, R_D 等	置 0 端（或复位端）
S, S_D	置 1 端（或置位端）
CP, CLK	时钟或时钟脉冲
D	D 触发器的输入端
J, K	JK 触发器的输入端
D_{SL}, D_{SR}	左移和右移串行数据输入端
PE, LD	置数控制（使能）端
TC, CO	进位输出端
$R/\overline{W}$	读/写控制端
I/O	输入/输出端
4 其 他 符 号	
BW	通频带或带宽
Q	静态工作点
φ	相位角
T	热力学温度（单位为 K）

目 录

前言

本书符号说明

绪论	1
0.1 电子技术概况	1
0.2 电子器件的基本材料——半导体	3
0.3 PN 结	7
习题	9

上篇 模拟电子技术

第 1 章 基本半导体器件	12
1.1 半导体二极管	12
1.2 半导体三极管	18
1.3 场效应晶体管	27
1.4 模拟集成电路	31
习题	33
第 2 章 常用放大电路单元	37
2.1 基本放大电路	38
2.2 集成运算放大电路	58
2.3 功率放大电路	67
习题	75
第 3 章 正弦信号产生电路	83
3.1 正弦波振荡电路的基本概念	84
3.2 RC 正弦波振荡电路	85
3.3 LC 正弦波振荡电路	88
习题	93
第 4 章 直流稳压电源	96
4.1 整流电路	97
4.2 滤波电路	100
4.3 稳压电路	102
习题	105
模拟电子电路应用实例	107
实例 1 双路输出±12V 稳压电源	107
实例 2 简易电子琴电路	107

下篇 数 字 电 子 技 术

第 5 章 数字电子技术基础知识	110
5.1 数制与编码	111
5.2 基本逻辑关系与逻辑门	114
5.3 逻辑函数	125
5.4 逻辑函数的卡诺图	129
习题	135
第 6 章 数字逻辑电路	138
6.1 组合逻辑电路	139
6.2 时序逻辑电路	151
6.3 半导体存储器与可编程逻辑器件	168
习题	176
第 7 章 脉冲信号的产生与整形	180
7.1 电压比较器	181
7.2 555 定时器与应用电路	184
习题	191
数字电子电路应用实例	194
实例 1 数字钟	194
实例 2 四路抢答器	196

附 篇 模 数 接 口

第 8 章 模拟与数字系统的接口	200
8.1 数模与模数转换器	201
8.2 综合电子系统实例	206
习题	211
附录 A 综合测试题 A 卷	213
附录 B 综合测试题 B 卷	216
附录 C 常用电阻器阻值和允许误差标注方法	219
附录 D 半导体分立器件型号命名方法	220
附录 E 二极管和晶体管的型号和主要参数举例	222
附录 F 集成电路型号命名方法	224
附录 G 习题参考答案 (部分)	225
参考文献	230

索引 (汉英对照)	231
-----------	-----

绪 论



你的位置

电子技术研究的主要内容是电子元器件、电子电路以及各种电信号。本章首先介绍电子技术的概况、本课程的内容与分类，然后介绍电子器件的基本材料——半导体的基本知识，最后介绍半导体器件的基本结构——PN结，为半导体器件的学习打下基础。



本章关键词

- ◆ 模拟信号、数字信号；
- ◆ 本征半导体、自由电子、空穴；
- ◆ N型半导体、P型半导体、多子、少子；
- ◆ PN结、单向导电性。

0.1 电子技术概况

0.1.1 电子技术的发展与应用

从美国的德福雷斯 1906 年发明了真空三极管至今，电子技术的发展经历了电子管、半导体三极管、半导体集成电路多个阶段，成为发展最迅速的一门学科。尤其在电子技术高度发展的今天，电子技术已经应用到工业、农业、国防等各个领域，电子技术已成为人类生存和发展的必需和关键因素，电子技术的发展水平也成为一个国家科技力量的重要标志。

电子技术是研究电子信号、电子电路与电子系统及应用的学科。各种电子电路组合成具有一定功能的电子系统，以完成对电子信号的各种处理。由于电子电路是由电子器件连接构成的，因此，电子技术的发展是建立在电子器件的发展上的。

真空三极管是第一代电子器件，体积大、耗能高，使电子设备的发展受到了较大的限制。1948 年研制成功的第二代电子器件——半导体三极管，使电子技术从真空时代进入固体时代，各种单个的电子器件与电容、电阻、电感、导线等连接起来就构成了各种电子电路和电子系统。分开独立的电子器件称为分立元件，由分立元件连接而成的电子电路称为分立元件电路。分立元件电路体积和质量较大，并且连接点较多，容易发生故障。基于解决这个问题的考虑，1958 年，美国德克萨斯公司发明了一种将晶体管、电阻、导线等集成为一体的、可以完成某种特定功能的新型功能器件，称为集成电路（Integrated Circuit，IC）。从此以后，集成电路的集成度（单位面积上能集成的单元器件数目）越来越高，几乎以几何级数的速度发展，从此电子技术进入了微电子时代。从开始的每片芯片上仅能制作 1~100 个晶体管的小规模集成电路发展到可集成 100~1000 个晶体管的中规模集成电路、集成度为 $10^3 \sim 10^5$ 的大规模集成电路、集成度为 $10^5 \sim 10^6$ 的超大规模集成电路等。

0.1.2 电子信号、电子电路与电子系统

1. 电子信号

信号是某种信息的载体,如电压信号、声音信号、温度信号、压力信号等,但声音、温度、压力等信号都属于非电物理量。这些非电物理量无法直接传递给电子系统,需要经过适当的传感器转换为电压或电流等电量,即电信号。

信号的形式是多种多样的,可以从不同的角度进行分类。例如,周期性和非周期性信号、确定信号与随机信号等。在电子技术中,由于分析方法的根本区别,更普遍的是将电子

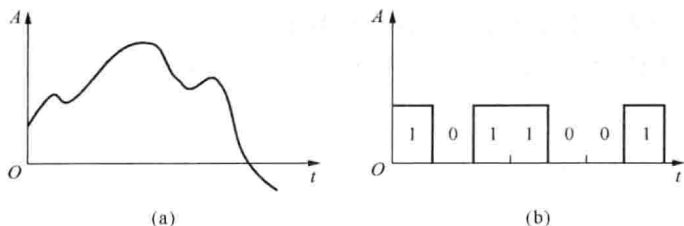


图 0.1.1 模拟信号和数字信号

(a) 模拟信号; (b) 数字信号

信号分为模拟信号与数字信号。模拟信号是指在时间上、幅值上都连续的电信号,如图 0.1.1 (a) 所示,正弦波就是典型的模拟信号;数字信号是指在时间上、幅值上都断续的电信号,图 0.1.1 (b) 给出了常见的数字信号波形。

自然界中的信号基本上都是模拟信号,比如温度、压力等信号随时间的变化均是连续不断的。经过传感器后形成的电信号根据传感器的不同可以是模拟信号也可以是数字信号。而计算机系统信号都是数字信号。所以,为了控制系统各部分间的“通信”,还经常需要将数字信号与模拟信号进行相互间的转换。

模拟信号的优点是直观且容易实现,但主要存在抗干扰能力差的问题。

数字信号正好相反,抗干扰能力强、可靠性高、能长期存储、便于加密和纠错,数字电路也更便于高度集成化。另外由于电子计算机处理的信号就是数字信号,因此数字信号一个重要的优点是便于计算机进行信息处理。

比如数字信号的抗干扰性,是因为数字信号只有 0 和 1 两种状态,在信号的接收端,当信号的幅度达到规定电平的一半及以上,就可以判为“1”信号,否则就判定为“0”信号。如果“1”信号受到干扰,使我们在某时收到了一个“0.9”,那么就认为原来的信号应该是 1,于是予以恢复。除非干扰强到把原来的信号变为“0.5”以下,但这种情况一般不会大量发生。

但数字信号也有占用频带较宽、技术要求相对复杂、进行模/数转换时会带来量化误差等问题,应根据情况合理处理。

2. 电子器件与电子电路

电子电路是由电子器件构成的,电子器件是电子电路、电子系统乃至电子技术学科的基础。

电子电路是指由若干电子器件相互连接构成的具有特定功能的电路整体。处理模拟信号电子电路称为模拟电路,处理数字信号电子电路称为数字电路。根据其功能的多少,电路可能简单也可能复杂,也可能是模拟与数字的混合电路。由于大规模集成电路和模拟-数字混合集成电路的大量出现,在单个集成芯片上可能集成许多种不同类型的电路,从而自成一个系统。例如,目前有多种单个芯片构成的数据采集系统产品,芯片内部往往包括多路模拟开关、可编程放大电路、取样-保持电路、模数转换电路、数字信号传输与控制电路等多种功能电路。

3. 电子系统

多种电子电路相互连接,形成一个能完成某些特定功能的电子系统。在实际应用中,电

子系统必须与其他物理系统相结合,才能构成完整的实用系统。例如,常见的VCD系统,在光盘上记录的声音和图像信号是通过激光传感系统转化为电信号的,而光盘的同步旋转和激光探头的移动则是通过电子系统控制的精密机械系统实现的。

0.1.3 课程的内容与分类

因为电子技术是研究电子信号、电子电路与电子系统及应用的学科,因此本书主要基于处理电子信号的基本电子电路,使读者对电子技术的概况有一个基本了解,从而能够了解简单电子系统的构成与应用,为电子技术的进一步深造或其他学科的学习打下基础。

电子技术课程主要包括模拟电子技术和数字电子技术两方面的内容,分别对应于本书的上篇和下篇。

模拟电子技术是研究模拟信号、模拟电子电路与系统的学科。模拟电路是处理模拟信号的电子电路,主要内容有半导体分立器件、半导体集成器件和由它们构成的电压放大电路、反馈放大电路、功率放大电路、信号产生电路、电源电路以及简单模拟系统的综合。模拟电子技术的基础是各种电子器件,重点是利用电子器件构成的各种基本单元电路,有了器件和单元电路的知识就可以由此构成较复杂的模拟电子电路和系统。

数字电子技术是研究数字信号、数字电路与系统的学科。数字电路是处理数字信号的电子电路,主要内容有数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形电路、可编程逻辑器件等以及简单数字系统的综合。数字电子技术的基础是基本逻辑关系和逻辑门等,重点是各种规模的数字集成电路。掌握了以上的数字电子基础知识,就可以用来构成各种数字电子电路和系统。

在实际的电子系统中,大多数的电子系统是既包括模拟电路又包括数字电路的混合系统,所以我们还要了解模拟电路与数字电路的接口电路,其典型代表就是附篇的数模与模数转换电路。

对于高等学校的学生,电子技术是一门非常重要的专业基础课。通过本课程的学习,学生可以掌握电子技术的基本概念、基本理论和基本技能,获得分析、设计、检测简单电子电路的能力,以及在以后的专业课学习、工作实践中能利用所学电子知识解决相关理论问题和工程技术问题的能力。

电子技术是一门实践性较强的学科,在学习时要树立工程估算的概念,并要加强实验、实习等实践性环节的学习。由于集成技术的发展,还必须重视集成器件的学习和使用。

0.2 电子器件的基本材料——半导体

你知道为什么以前习惯把收音机称为“半导体”吗?那是因为电子器件的基本材料是半导体,电子器件也被普遍地称为半导体器件,而收音机中的主要器件都是半导体器件,所以人们通常把收音机简称为“半导体”。那么,为什么其他材料,比如说导体不能作为构成电子器件的基础材料呢?要想知道答案,就要从半导体的基本特性说起。

半导体是导电能力处于导体和绝缘体之间的物质,通常,用电阻率表示物质导电能力的强弱,电阻率越小,导电能力就越强。半导体的电阻率在 $10^{-1} \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ 之间,如锗(Ge)、硅(Si)、硒(Se)、砷化镓(GaAs)等元素以及一些金属硫化物和氧化物等。

半导体的导电特性具有不同于其他物质的热敏性、光敏性与杂敏性。也就是说半导体的导电能力随温度升高、光照增强和掺入杂质元素的增加而显著增强。例如,纯净的锗在温度每增加 10°C 时,其电阻率几乎减小为原来的 $1/2$;一种硫化镉薄膜,在暗处其电阻为几十兆欧,受光照后,电阻可以下降到原来的 1% ;在纯净的半导体硅中掺入亿分之一的硼,电阻率会下降为原来的几万分之一。以上特性是半导体和绝缘体都不具备的,因此,利用这些特性可以制造出性能不同、用途各异的半导体器件。

半导体器件是 20 世纪中期开始发展起来的,具有体积小、质量小、使用寿命长、可靠性高、输入功率小和功率转换效率高等优点,在现代电子技术中获得了广泛的使用。一般的半导体器件都具有能量控制作用,因此,也称为有源器件。

半导体之所以具有上述特性,根本原因在于其特殊的原子结构。

0.2.1 本征半导体

现代电子学中,最常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge),其原子的外层电子数分别为 14、32,均为具有 4 个最外层价电子的四价元素,其原子结构可以表示成图 0.2.1 所示的简化模型。

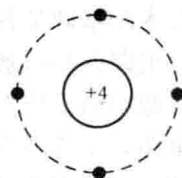


图 0.2.1 硅和锗的原子结构简化模型

1. 本征半导体

通常把纯净的不含任何杂质的半导体称为本征半导体。在实际应用中,必须将半导体提炼成单晶体,使它的原子排列由杂乱无章的状态变成有一定规律、整齐排列的晶体结构,如图 0.2.2 所示,称为单晶,即本征半导体。硅和锗等半导体都是晶体,所以半导体管又称为晶体管。

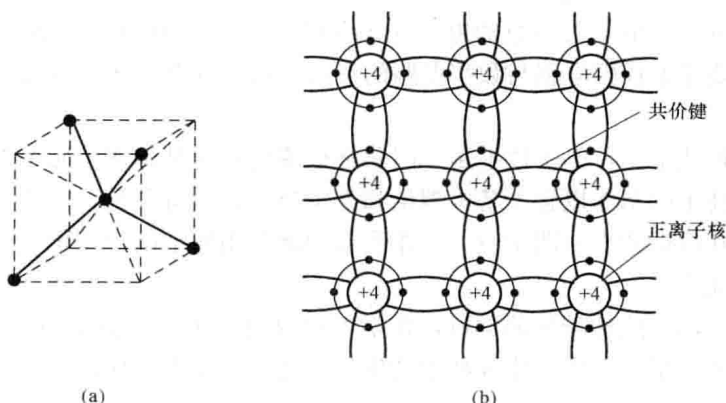


图 0.2.2 本征硅(或锗)的晶体结构
(a) 结构图; (b) 平面示意图与共价键

从图 0.2.2 (b) 的平面示意图可以看出,硅或锗原子间以共价键结合,每个原子的最外层都形成 8 个价电子的稳定结构。所以,半导体的价电子既不像导体那样容易挣脱成为自由电子,也不像在绝缘体中被束缚得那样紧。因为导电能力的强弱,在微观上看就是单位体积中能自由移动的带电粒子数目的多少,因此,半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

2. 本征激发与复合

在本征半导体中,总有一些价电子从热运动中获得足够的能量,能挣脱共价键的束缚而成为带单位负电荷的自由电子。同时,在原来共价键位置上留下一个相当于带有单位正电荷

电量的空位，称为空穴，这种现象称为本征激发。本征激发出来的自由电子和空穴总是成对出现的，称为自由电子-空穴对，如图 0.2.3 所示。相反，自由电子和空穴在热运动中又可能重新相遇结合而消失，称为复合。

本征激发和复合总是同时存在、同时进行的，在温度一定的情况下，两者达到动态平衡。也就是说，温度一定时，整块半导体内的自由电子与空穴的数目保持一定且相等，半导体呈电中性，不带电量。一般在室温时，纯硅中的自由电子浓度 n 与空穴浓度 P 约为

$$n = P \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ 个/cm}^3 \quad (0.2.1)$$

对于纯锗来说，这个数字约为 $2.5 \times 10^{13} \text{ 个/cm}^3$ 。而金属导体中的自由电子浓度约为 10^{22} 个/cm^3 ，从数字上可以看出，本征半导体的导电能力是很差的。

温度越高，光照越强，本征激发越激烈，产生的自由电子-空穴对越多，半导体的导电能力就越强。这就是半导体材料具有热敏性和光敏性的本质原因。

3. 自由电子运动与空穴运动

本征半导体每激发出一个带负电的自由电子，就会留下一个空穴，使电中性的原子变成了带正电的正离子，或者说相当于相应的空穴带一个单位的正电荷。在热能或外加电场作用下，邻近原子带负电的价电子很容易跳过来填补这个空位，相当于此处的空穴转移到相邻的原子处去，如图 0.2.4 所示，价电子由 B 到 A 的运动，相当于空穴由 A 到 B 的移动。新形成的这个空位，又被其他相邻原子的价电子所填补，这样的依次递补形成了空穴的相对运动——就像一个带正电的空穴在价电子移动的反方向上运动一样，所以，空穴运动的实质就是价电子依次填补空位的运动。在电子技术中，将空穴看成是一种带单位正电荷的、与自由电子一样可以运动的粒子，统称为载流子。

在外加电场的作用下，半导体中带负电的自由电子逆电场方向移动形成电子电流 I_N ，带正电的空穴顺电场方向移动形成空穴电流 I_P ，如图 0.2.5 所示，总电流 I 是电子电流 I_N 和空穴电流 I_P 的和，即

$$I = I_N + I_P \quad (0.2.2)$$

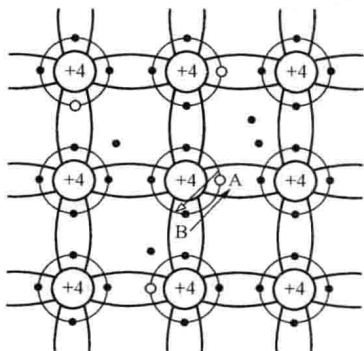


图 0.2.4 空穴运动

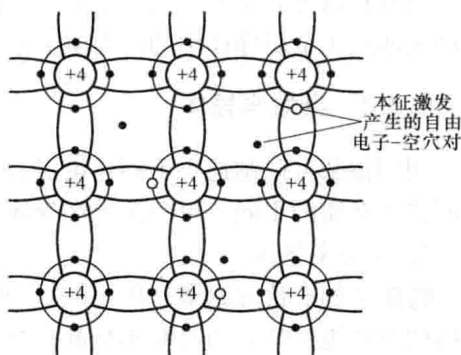


图 0.2.3 本征激发产生自由电子-空穴对

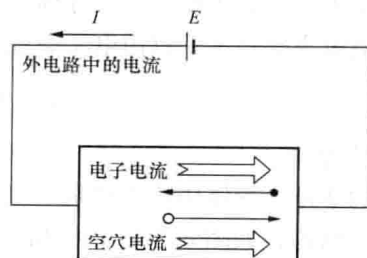


图 0.2.5 本征半导体中载流子的导电方式

同时有两种载流子参与导电是半导体所独有的,但由于半导体中自由电子与空穴浓度之和仍远远低于金属导体中的自由电子浓度,所以半导体的导电能力仍然极差。

0.2.2 杂质半导体

利用掺杂可以制造出不同导电能力、不同用途的半导体器件,这就是半导体的杂敏性。根据掺入杂质的不同,可将杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

将微量的五价元素磷 (P) 掺入四价本征半导体后,由于磷原子数量较少,不能改变本征硅的共价键结构,而是和本征硅一起组成共价键,如图 0.2.6 (a) 所示。

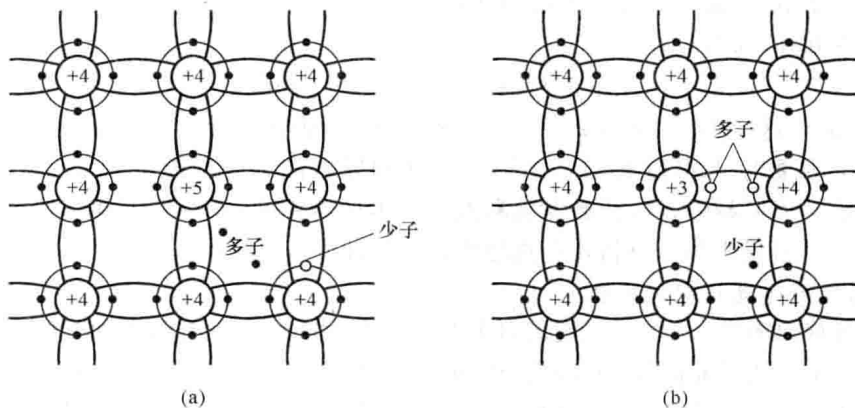


图 0.2.6 杂质半导体

(a) N 型半导体; (b) P 型半导体

磷原子用 4 个价电子与和它相邻的 4 个硅原子构成共价键后,剩余的一个价电子就成为了带负电的自由电子,同时,磷原子由于失去一个电子,而成为带正电的离子。因此,每掺入一个杂质原子,就相当于掺入了一个自由电子,掺入杂质的浓度越高,提供的自由电子的浓度就越高,杂质半导体的导电能力就越强。

例如,在本征硅中掺入亿分之一的五价元素,则掺入的自由电子数为 $10^{-8} \times 10^{22} \text{ 个/cm}^3 = 10^{14} \text{ 个/cm}^3$,远远高于 10^{10} 个/cm^3 的本征载流子浓度。掺杂后自由电子的数目主要取决于掺杂浓度,是占多数的载流子,简称多子;掺杂后的空穴仍然来源于本征激发,为少子。由于整块半导体并没有额外获得电荷,仍然呈电中性。

这种多子为自由电子的掺杂半导体称为 N⁺ 型或电子型半导体。当外加电场时,流过 N 型半导体的电流主要是多子自由电子形成的电流,即

$$I = I_N + I_P \approx I_N \quad (0.2.3)$$

2. P 型半导体

在四价的本征半导体中掺入微量的三价元素硼 (B) 之后,硼原子也和周围相邻的硅原子组成共价键结构,如图 0.2.6 (b) 所示。

① Negative 的首字母,因 N 型半导体中带负电的自由电子是多数载流子。

与 N 型半导体类似, 由于三价硼原子的最外层只有 3 个价电子, 每掺入一个硼原子就相当于掺入了一个能接受电子的空穴, 同时自己成为带负电的离子, 此时空穴为多子、自由电子为少子。这种杂质半导体称为 P^① 型或空穴型半导体, 整块半导体宏观上看仍为电中性。

在外加电场作用下, P 型半导体总的电路电流约为多子空穴形成的电流, 即

$$I = I_N + I_P \approx I_P \quad (0.2.4)$$

需要注意的是: 杂质半导体中的多子浓度约等于所掺杂质原子的浓度, 受温度影响较小, 而少子是热运动产生的, 所以尽管浓度较低, 却对温度非常敏感, 这是半导体器件温度稳定性较差的主要原因。

0.3 PN 结

几乎所有的半导体器件都是由不同数量和结构的 PN 结构成的。

0.3.1 PN 结的形成

在一块本征半导体上通过某种掺杂工艺, 使其分别形成 N 型和 P 型两部分区域后, 在它们的交界处形成的特殊薄层, 就是 PN 结。几乎所有的半导体器件都是由不同数量和结构的 PN 结构成的。

1. 多子的扩散运动建立内电场

图 0.3.1 (a) 中的 $\ominus$ 和 $\oplus$ 分别代表 P 区和 N 区的杂质离子。因为 P 区的多子空穴与 N 区的多子自由电子互相向对方扩散^②并复合, 所以在 P 区和 N 区的交界处使载流子复合殆尽, 形成由不能移动的带电杂质离子组成的空间电荷区——N 区为正离子区、P 区为负离子区, 这些正负离子形成了一个从 N 区指向 P 区的内电场, 如图 0.3.1 (b) 所示。

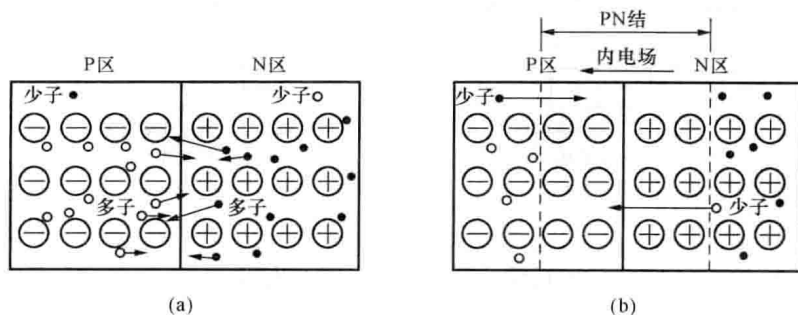


图 0.3.1 PN 结的形成

(a) 多子的扩散运动; (b) PN 结中的内电场与少子漂移

2. 内电场阻碍多子扩散、帮助少子漂移运动, 形成平衡 PN 结

多子扩散建立起的内电场对多子产生的电场力与其扩散方向相反, 使多子扩散运动逐渐

① Positive 的首字母, 因 P 型半导体中带正电的空穴是多数载流子。

② 载流子在浓度差的作用下产生的由高浓度向低浓度方向的定向运动称为扩散运动。