

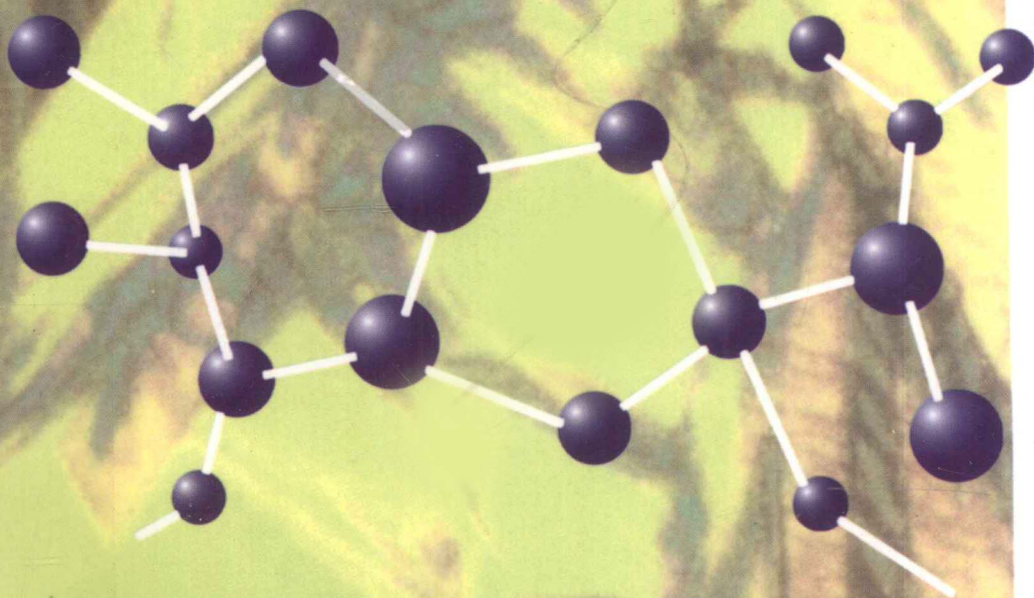
面向21世纪新教材
2003年度国家精品课程教材
新世纪网络课程教材

材料科学基础

(第三版)

FUNDAMENTALS OF MATERIALS SCIENCE

胡赓祥 蔡 珣 戎咏华 编著
上海市教育委员会组编



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

面向 21 世纪新教材
2003 年度国家精品课程教材
新世纪网络课程教材

材料科学基础

Fundamentals of Materials Science

(第三版)

胡赓祥 蔡 珣 戎咏华 编著

上海市教育委员会组编

上海交通大学出版社

内 容 简 介

材料科学是研究材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间相互关系的新兴学科,它将金属、陶瓷、高分子等不同材料的微观特性和宏观规律建立在共同的理论基础上,对生产、使用和发展材料具有指导意义。本书是材料科学与工程专业的基础理论教材,属上海市普通高校“九五”重点教材建设项目,并且列入“2003年度国家精品课程”。其内容包括:材料的微观结构,晶体缺陷,原子及分子的运动,材料的范性形变和再结晶,相平衡及相图,材料的亚稳态,材料的物理特性等,着重于基本概念和基础理论,强调科学性、先进性和实用性,介绍材料科学领域的新发展,注意应用理论于解决实际问题。本书第三版是在教学实践和学科发展的基础上,对第一、二版内容作了适当的修改和补充,以适应教学之需。

本书既是材料科学与工程或相关专业的教材,也可用作从事材料研究、生产和使用的科研人员 and 工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/胡赓祥,蔡珣,戎咏华编著. —3版.

—上海:上海交通大学出版社,2010

ISBN 978-7-313-02480-0

I. 材... II. ①胡... ②蔡... ③戎... III. 材料科学—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 071693 号

材料科学基础

(第三版)

胡赓祥 蔡珣 戎咏华 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:30.5 插页:2 字数:750千字
2000年11月第1版 2010年5月第3版 2010年5月第15次印刷

印数:10030

ISBN 978-7-313-02480-0/TB 定价:49.50元

版权所有 侵权必究

序

“材料科学基础”是材料科学与工程专业的的主要理论基础课程。这个专业建立已逾40年,但国际上还没有很合适的材料科学基础教材。编写这类教材的困难之处在于,既要横向地融合金属材料、陶瓷材料和高分子材料的基础理论于一炉,又要纵向地充分运用本专业学生已学过的基础知识(包括材料热力学、材料动力学、固体物理、量子力学和统计物理等),并能连接继后有关材料测试、加工和应用等课程。本人在担任“材料科学基础”教席数年经验的基础上和其他同事们共同编写了《材料科学导论》(上海科学技术出版社,1986),权作为这门课程的教材,并经几所大学(武汉大学等)试用。此书虽名为导论,实际执笔者较多,篇幅较大,上述两个困难并未很好给以解决。十余年来国内大学材料系中多数似仍以金属学(台湾称物理冶金学)作为基础课程。面向扩大专业内容的教学改革,“材料科学基础”的确已属共识,相应的教材就显得十分需要。上海市人民政府高瞻远瞩,着重专业教材建设。上海市教委于1998年决定以《材料科学基础》为“九五”重点教材并资助出版。上海交通大学胡赓祥教授、蔡珣教授、戎咏华教授和华东理工大学黄恽副教授都具有丰富的教学经验并热心教学改革,勇于担任本书的编著任务,无疑是一项艰巨和珍贵的尝试。本书的出版标志着我国材料专业建设迈入新的征程,承前启后,作用匪浅。

教材建设需经千锤百炼。随着我国经济的持续发展,科教兴国战略的深入贯彻,新型的、较有宽广材料基础、并有志教育人才的茁长,材料专业的教学改革和教材建设事业必将更加灿烂夺目。在草草阅读本书样稿后,谨记述个人的感触情怀,聊以为序。

徐祖耀
2000年9月

前 言

材料科学是研究材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间相互关系的科学,它对生产、使用和发展材料具有指导意义。材料对人类历史的进展起着重要的作用,人类使用材料已有悠久的历史,随着人类文明和生产的发展,对材料的要求不断增加和提高,于是由采用天然材料进而为加工制作,再发展为研制合成。在近代科学技术的推动下,材料的品种日益增多,不同效能的新材料不断涌现,原有材料的性能也更为改善与提高、力求满足各种使用要求,故材料科学又成为科学技术发展的基础、工业生产的支柱。在材料科学发展过程中,为了改善材料的质量、提高其性能、扩大品种、研究开发新型材料,人们必须加深对材料的认识,从理论上阐明其本质,掌握其规律,以此指导实践。通过从其他学科如物理、化学、力学、工程学等领域吸取有关的理论基础,进行彼此间的交叉渗透,并应用各种实验手段从宏观现象到微观结构作测试分析,结合生产和应用实践,予以分析归纳、总结深化,取得了材料理论的迅速进展。但原先由于所用原料及制备过程的不同,通常把材料归类为金属材料、陶瓷材料、高分子材料等类型,故材料理论的发展也分别有金属学、陶瓷学、高分子物理学等范畴。随着认识的提高和深入,人们发现不同类型的材料虽各有其特点,却有许多共性和相通之处,它们的微观特性和宏观规律能以统一的理论来概括,于是就逐渐形成材料科学这门新兴学科。

学科的发展必然带来教学体系的相应变化,自 20 世纪 60 年代起,美国高校开始出现以“材料科学与工程”系取代原先冶金系的变革,将专业范围由金属扩大到陶瓷,并进一步包含高分子材料。这些年来,这一变革逐渐为国际同行所认同,纷纷相继成立这方面的系或专业,我国也于 20 世纪 80 年代初经国家教委决定试办材料科学专业,以此与国际接轨。近年教育部已将材料科学与工程定为一级学科,这是材料学科发展的必然方向,是适应 21 世纪对材料领域专门人才需求的必要措施。针对上述情况,作为专业基础理论的课程“材料科学基础”迫切需要适用的教材以解决教学之需。本书是根据上海市普通高校“九五”重点教材建设计划所提出的任务而编写的。其意图是改革传统的按材料分类的专业理论基础,拓宽专业面,将原先限于各自范畴的内容在共同的基础上融合为一体。其编写原则是从教学要求出发,着重于基本概念和基础理论,适当地掌握内容的深度和广度,要求科学性、先进性和实用性,并引导学生应用理论以解决材料工程的实际问题。

本书的内容安排如下:材料内部的微观结构,包括原子态到聚合态(第 1 章),从理想的完整结构(第 2 章)到存在各种缺陷的不完整晶体结构(第 3 章),原子和

分子在固体中的运动(第4章),以及材料在受力变形时组织结构的变化和恢复过程(第5章);在上述基础上,进一步介绍材料组织结构的转变规律,包括单元系转变(第6章),二组元间的相互作用及转变(第7章)和三元系的相互作用规律(第8章),通过这些内容了解材料的形成规律和存在状态。鉴于上述内容主要是对材料处于平衡状态(稳定态)而言,而实际材料(特别是金属材料)却往往在非平衡的亚稳态使用,因为材料处于亚稳态时其某些性能往往远高于平衡态时的性能,为此编写了有关材料亚稳态的内容列于第9章中,其中还介绍了近年来在亚稳态研究中的一些新成就,如纳米晶、准晶态及非晶态材料等,让学生了解材料科学发展的一些动态。

本书的编写者为上海交通大学蔡珣教授(第1,2,3,5,8章),上海交通大学戎咏华教授(第4,6,7章),上海交通大学胡赓祥教授(第9章),华东理工大学黄恽副教授(各章中有关高分子材料部分),全书由胡赓祥教授、蔡珣教授、戎咏华教授编著。上海市教委、上海交通大学对本书的编写和出版给予大力支持和提供经济资助,中科院院士、上海交通大学徐祖耀教授对本书的编写十分关心和支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书的编写是新的尝试过程,由于水平有限,经验不多,缺点和错误之处恳切希望读者提出宝贵意见。

编著者

2000年7月

第二版说明

这本教材自2000年底出版以来已印刷了7次,共计17000余册,这表明它在我国高校有关教学中已得到广泛的采用和认同。5年来,经过教学实践,师生们对教材提出了不少宝贵的意见和建议。因此,这次再版时,我们据此又进行了修订。

本书在首批国家精品课程评选中被列入“2003年度国家精品课程”教材。

材料科学作为一门新兴学科,这几年中又有许多新的发展,在修订教材时应如何考虑之?按照本书前言中所明确的编写原则:“从教学要求出发,着重于材料科学的基本概念和基础理论,适当地掌握内容的深度和广度,要求科学性、先进性和实用性,并引导学生应用理论于解决材料工程的实际问题。”经过认真的审定,我们认为,虽然近年来材料科学在不断地发展中,但仍建立在原先的基本概念和基础理论上,原教材的内容依然是掌握本学科所必需的和适用的。据此,在修订中只作了一些必要的修改和补充,以保持其科学性、先进性和实用性。

本书这次修订的主要内容有以下几点:

(1) 适当地充实有关高分子及陶瓷方面的内容,如第1章中添加了高分子链构象统计;第5章中补充了陶瓷材料变形的特点;第7章中增加了高分子聚合方法及三类用途的高分子基本知识。

(2) 对有关基本理论方面作了补充:第2章中添加了倒易点阵知识;第4章加强了对扩散第二定律的不同解法和关联;第5章中介绍了热变形时的动态回复和再结晶;第6章中增加了气-固相变和薄膜生长,以及凝固理论的应用举例,以充实新材料制备技术所需的理论知识。

(3) 对当前材料科学领域的发展动态,难以列入作为专业基础教材的内容中,但为了启发学生对新事物的兴趣和探讨,在第9章中,提到了当前科学界和工程界均极为关注的纳米碳管,将其作为典型介绍一下,以能起到引导作用。

(4) 鉴于功能材料在当前新材料领域中占有极重要的地位,而原教材中对功能材料所需的基础知识显然不足。为此增添了第10章,主要对材料的电、磁、热和光学特性的表述、起源和对它们的影响因素等内容进行介绍,为以后涉及这方面的材料提供了必要的基础知识。

以上修订工作均由各章的原编写人进行,增添的第10章“材料的功能特性”由戎咏华教授编写。

虽然我们在修订中作了努力,但错误和不当之处仍然难免,请读者们继续提出宝贵意见。

编著者

2006年1月

第三版说明

近些年来,应高、新科学技术及工程、制造等产业飞速发展之需,相应的新材料、新工艺大量涌现,而传统材料和生产技术也不断提高更新。材料领域的进展森罗万象,令人目不暇接。要求学生全面、具体地掌握这样蔚为大观的内容显然是不可能、也不必要的。事实上,万变不离其宗,各种材料的研究开发和制备仍然遵循着“成分-组织结构-性能”之间的基本关系展开的。材料科学的基本概念和基础理论仍然是材料工作者的专业基础。这项认识促成了《材料科学基础》教材第三版的出版。

根据师生们通过教学实践对本书提出的进一步意见和建议,我们在第三版作了相应的修订,包括某些内容的适当增减;对第二版排印中文字图表错误予以纠正;并添加了英文目录和关键词的中英文对照表,以便于学生参阅英文文献。

正如序言中所指出的:“教材建设需经千锤百炼”,我们虽不断努力,但难以完善,请读者继续提出宝贵意见。

编著者

2009年9月

目 录

第 1 章 原子结构与键合	1
1.1 原子结构	1
1.1.1 物质的组成.....	1
1.1.2 原子的结构.....	1
1.1.3 原子的电子结构.....	2
1.1.4 元素周期表.....	3
1.2 原子间的键合	4
1.2.1 金属键.....	4
1.2.2 离子键.....	5
1.2.3 共价键.....	5
1.2.4 范德瓦耳斯力.....	6
1.2.5 氢键.....	7
1.3 高分子链	8
1.3.1 高分子链的近程结构.....	9
1.3.2 高分子链的远程结构	14
第 2 章 固体结构	19
2.1 晶体学基础.....	19
2.1.1 空间点阵和晶胞	19
2.1.2 晶向指数和晶面指数	23
2.1.3 晶体的对称性	28
2.1.4 极射投影	31
2.1.5 倒易点阵	34
2.2 金属的晶体结构.....	35
2.2.1 三种典型的金属晶体结构	35
2.2.2 晶体的原子堆垛方式和间隙	39
2.2.3 多晶型性	41
2.3 合金相结构.....	42
2.3.1 固溶体	42
2.3.2 中间相	47
2.4 离子晶体结构.....	56
2.4.1 离子晶体的结构规则	57
2.4.2 典型的离子晶体结构	59

2.4.3	硅酸盐的晶体结构	64
2.5	共价晶体结构	68
2.6	聚合物的晶态结构	70
2.6.1	聚合物的晶体形态	70
2.6.2	聚合物晶态结构的模型	72
2.6.3	聚合物晶体的晶胞结构	73
2.7	准晶态结构	76
2.8	液晶态结构	77
2.8.1	液晶的分子结构特征与分类	77
2.8.2	液晶的结构	78
2.9	非晶态结构	79
第3章	晶体缺陷	83
3.1	点缺陷	83
3.1.1	点缺陷的形成	83
3.1.2	点缺陷的平衡浓度	85
3.1.3	点缺陷的运动	86
3.2	位错	87
3.2.1	位错的基本类型和特征	87
3.2.2	伯氏矢量	91
3.2.3	位错的运动	94
3.2.4	位错的弹性性质	99
3.2.5	位错的生成和增殖	107
3.2.6	实际晶体结构中的位错	110
3.3	表面及界面	121
3.3.1	外表面	122
3.3.2	晶界和亚晶界	123
3.3.3	孪晶界	128
3.3.4	相界	129
第4章	固体中原子及分子的运动	131
4.1	表象理论	131
4.1.1	菲克第一定律	131
4.1.2	菲克第二定律	132
4.1.3	扩散方程的解	133
4.1.4	置换型固体中的扩散	140
4.1.5	扩散系数 D 与浓度相关时的求解	142
4.2	扩散的热力学分析	144
4.3	扩散的原子理论	146

4.3.1	扩散机制	146
4.3.2	原子跳跃和扩散系数	148
4.4	扩散激活能	152
4.5	无规则行走与扩散距离	152
4.6	影响扩散的因素	154
4.7	反应扩散	156
4.8	离子晶体中的扩散	157
4.9	高分子的分子运动	160
4.9.1	分子链运动的起因及其柔顺性	160
4.9.2	分子的运动方式及其结构影响因素	161
4.9.3	高分子不同力学状态的分子运动解说	163
第5章	材料的形变和再结晶	167
5.1	弹性和黏弹性	167
5.1.1	弹性变形的本质	167
5.1.2	弹性变形的特征和弹性模量	168
5.1.3	弹性的不完整性	170
5.1.4	黏弹性	171
5.2	晶体的塑性变形	172
5.2.1	单晶体的塑性变形	172
5.2.2	多晶体的塑性变形	183
5.2.3	合金的塑性变形	185
5.2.4	塑性变形对材料组织与性能的影响	191
5.3	回复和再结晶	196
5.3.1	冷变形金属在加热时的组织与性能变化	196
5.3.2	回复	198
5.3.3	再结晶	200
5.3.4	晶粒长大	206
5.3.5	再结晶退火后的组织	210
5.4	热变形与动态回复、再结晶	213
5.4.1	动态回复与动态再结晶	214
5.4.2	热加工对组织性能的影响	216
5.4.3	蠕变	217
5.4.4	超塑性	219
5.5	陶瓷材料变形的特点	221
5.6	高聚物的变形特点	223
第6章	单组元相图及纯晶体的凝固	226
6.1	单元系相变的热力学及相平衡	226

6.1.1	相平衡条件和相律	226
6.1.2	单元系相图	226
6.2	纯晶体的凝固	229
6.2.1	液态结构	229
6.2.2	晶体凝固的热力学条件	229
6.2.3	形核	230
6.2.4	晶体长大	236
6.2.5	结晶动力学及凝固组织	240
6.2.6	凝固理论的应用举例	244
6.3	气-固相变与薄膜生长	246
6.3.1	蒸气压	246
6.3.2	蒸发和凝聚的热力学条件	248
6.3.3	气体分子的平均自由程	249
6.3.4	形核	249
6.3.5	薄膜的生长方式	250
6.3.6	应用举例(巨磁电阻多层膜和颗粒膜)	251
6.4	高分子的结晶特征	252
第7章	二元系相图和合金的凝固与制备原理	256
7.1	相图的表示和测定方法	256
7.2	相图热力学的基本要点	258
7.2.1	固溶体的自由能-成分曲线	258
7.2.2	多相平衡的公切线原理	259
7.2.3	混合物的自由能和杠杆法则	260
7.2.4	从自由能-成分曲线推测相图	261
7.2.5	二元相图的几何规律	263
7.3	二元相图分析	263
7.3.1	匀晶相图和固溶体凝固	263
7.3.2	共晶相图及其合金凝固	267
7.3.3	包晶相图及其合金凝固	272
7.3.4	溶混间隙相图与调幅分解	275
7.3.5	其他类型的二元相图	276
7.3.6	复杂二元相图的分析方法	282
7.3.7	根据相图推测合金的性能	283
7.3.8	二元相图实例分析	285
7.4	二元合金的凝固理论	293
7.4.1	固溶体的凝固理论	293
7.4.2	共晶凝固理论	305
7.4.3	合金铸锭(件)的组织与缺陷	314

7.4.4	合金的铸造和二次加工	318
7.5	高分子合金概述	320
7.5.1	高分子合金的相容性	320
7.5.2	高分子体系的相图及测定方法	321
7.5.3	高分子合金的制备方法	323
7.5.4	高分子合金的形态结构	329
7.5.5	高分子合金性能与组元的一般关系	331
7.5.6	高分子及其合金的主要类型	332
7.6	陶瓷合金概述	333
7.6.1	陶瓷粉体的合成	334
7.6.2	陶瓷粉体的成型和烧结	335
7.6.3	玻璃的制备	336
7.6.4	陶瓷材料的性能	337
第8章	三元相图	340
8.1	三元相图的基础	340
8.1.1	三元相图成分表示方法	340
8.1.2	三元相图的空间模型	342
8.1.3	三元相图的截面图和投影图	343
8.1.4	三元相图中的杠杆定律及重心定律	345
8.2	固态互不溶解的三元共晶相图	346
8.3	固态有限互溶的三元共晶相图	350
8.4	两个共晶型二元系和一个匀晶型二元系构成的三元相图	355
8.5	包共晶型三元系相图	356
8.6	具有四相平衡包晶转变的三元系相图	358
8.7	形成稳定化合物的三元系相图	360
8.8	三元相图举例	361
8.9	三元相图小结	369
第9章	材料的亚稳态	372
9.1	纳米晶材料	372
9.1.1	纳米晶材料的结构	373
9.1.2	纳米晶材料的性能	375
9.1.3	纳米晶材料的形成	377
9.1.4	纳米碳管简介	377
9.2	准晶态	378
9.2.1	准晶的结构	378
9.2.2	准晶的形成	380
9.2.3	准晶的性能	381

9.3	非晶态材料	381
9.3.1	非晶态的形成	382
9.3.2	非晶态的结构	386
9.3.3	非晶合金的性能	387
9.3.4	高分子的玻璃化转变	389
9.4	固态相变形成的亚稳相	391
9.4.1	固态相变概述	391
9.4.2	固溶体脱溶分解产物	392
9.4.3	马氏体转变	403
9.4.4	贝氏体转变	411
第 10 章	材料的功能特性	417
10.1	功能材料的物理基础概述	417
10.1.1	能带	417
10.1.2	费米能	418
10.2	电性能	418
10.2.1	电性能的表述	418
10.2.2	基于能带理论的传导	419
10.2.3	电子迁移率	420
10.2.4	金属的电阻率	420
10.2.5	本征和非本征半导体的电导率	421
10.2.6	绝缘体的电导率和介电性	424
10.3	热性能	427
10.3.1	热容	427
10.3.2	热膨胀	429
10.3.3	热传导	430
10.3.4	热应力	431
10.4	磁性能	432
10.4.1	磁性能的表象描述	432
10.4.2	磁矩的起源	433
10.4.3	磁性的分类	434
10.4.4	畴和磁滞	437
10.4.5	软磁和硬磁材料	438
10.5	光学性能	439
10.5.1	电磁辐射	439
10.5.2	光与固体的交互作用	440
10.5.3	原子和电子的交互作用	441
10.5.4	折射	442
10.5.5	反射	443

10.5.6 吸收	443
10.5.7 透射	445
10.5.8 颜色	446
10.5.9 受激发射和光放大	447
中英对照的关键词	449
参考文献	460

Contents

Chapter 1 Atomic structure and interatomic bonding	1
1.1 Atomic structure	1
1.1.1 Substance construction	1
1.1.2 Structure of atoms	1
1.1.3 Electronic structure of atoms	2
1.1.4 The periodic table of elements	3
1.2 Interatomic bonding	4
1.2.1 Metallic bonding	4
1.2.2 Ionic bonding	5
1.2.3 Covalent bonding	5
1.2.4 Van der Waals bonding	6
1.2.5 Hydrogen bonding	7
1.3 Polymer chain structure	8
1.3.1 Short-range structure of polymer chains	9
1.3.2 Long-range structure of polymer chains	14
Chapter 2 The structure of solids	19
2.1 Fundamentals of crystallography	19
2.1.1 Space lattice and unit cells	19
2.1.2 Miller indices for directions and planes	23
2.1.3 Crystal symmetry	28
2.1.4 Polar projection	31
2.1.5 Reciprocal lattice	34
2.2 Metallic crystal structures	35
2.2.1 Three typical metallic crystal structures	35
2.2.2 Close-packed crystal structures and interstitial sites	39
2.2.3 Polymorphism	41
2.3 Structure of alloy phases	42
2.3.1 Solid solutions	42
2.3.2 Intermediate phases	47
2.4 Ionic crystal structures	56
2.4.1 Pauling's rule of ionic crystals	57
2.4.2 Typical ionic crystal structures	59

2.4.3	Silicate structures	64
2.5	Covalent crystal structures	68
2.6	Polymer crystals	70
2.6.1	Crystal morphology of polymer	70
2.6.2	Structure model of polymer crystals	72
2.6.3	Unit cells of polymer crystals	73
2.7	Structure of the quasi-crystalline state	76
2.8	Structure of the liquid-crystalline state	77
2.8.1	Molecular structure and classification of the liquid-crystalline state	77
2.8.2	Structure of the liquid-crystalline state	78
2.9	Structure of the noncrystalline state	79
Chapter 3	Imperfections in crystalline solids	83
3.1	Point defects	83
3.1.1	Formation of point defects	83
3.1.2	Equilibrium concentration of point defects	85
3.1.3	Movement of point defects	86
3.2	Dislocations—Linear defects	87
3.2.1	Basic types and characteristics of dislocations	87
3.2.2	Burgers vector	91
3.2.3	Movement of dislocations	94
3.2.4	Elastic properties of dislocations	99
3.2.5	Formation and proliferation of dislocations	107
3.2.6	Dislocations in real crystals	110
3.3	Surface and interface	121
3.3.1	Outer surface	122
3.3.2	Grain boundaries and sub-grain boundaries	123
3.3.3	Twin boundaries	128
3.3.4	Phase boundaries	129
Chapter 4	Motion of atoms and molecules in solids	131
4.1	Phenomenological theory	131
4.1.1	Fick's first law	131
4.1.2	Fick's second law	132
4.1.3	Solutions to diffusion equations	133
4.1.4	Diffusion in substitutional solid solutions	140
4.1.5	Solution to diffusion coefficient associated with concentration	142
4.2	Thermodynamic analysis of diffusion	144