

现代物理基础丛书

34

近代晶体学

(第二版)

张克从 著



科学出版社

现代物理基础丛书 34

近代晶体学

(第二版)

张克从 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地论述晶体与近代晶体学、晶体结构周期性点阵描述、晶体对称性理论、晶体形态学、晶体的衍射效应及其应用、晶体结构及其形成、晶体的物理性质、晶体生长、晶体缺陷、磁晶与磁群、准晶体、纳米晶体、液晶等。

全书共 14 章。第一至十章多属于经久不衰、长期起作用的晶体学理论及其应用。第十一至十四章为近代晶体学发展拓宽的内容。

本书可供从事晶体学、晶体物理、晶体化学、材料科学等研究、教学和应用的有关人员及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

近代晶体学/张克从著. —2 版. —北京: 科学出版社, 2011
(现代物理基础丛书; 34)

ISBN 978-7-03-031275-4

I. ① 近… II. ① 张… III. ① 晶体学 IV. ① O7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 101512 号

责任编辑: 胡 凯 刘凤娟/责任校对: 钟 洋
责任印制: 钱玉芬/封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1987年2月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011年5月第 二 版 印张: 38 1/4

2011年5月第一次印刷 字数: 740 000

印数: 1-2 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第二版前言

作为《凝聚态物理学丛书》之一,《近代晶体学基础》(上、下册,共12章)第一版于1987年出版,对推动我国近代晶体学及相关学科的发展起到积极的促进作用.

第一版内容反映了20世纪90年代中期以前近代晶体学发展的学科水平.20多年来,现代科学技术特别是电子计算技术的迅速发展,促成近代晶体学向各个相关学科渗透.渗透的结果不仅使近代晶体学本身进一步向深层次的研究方向发展,而且相继出现了与近代晶体学密切相关的新兴学科,明显将近代晶体学的研究领域拓宽.

为了使本书更有系统性、时代性,更能反映出近代晶体学发展的全貌,作者根据20多年来近代晶体学取得的研究成果以及最近的研究进展,以第一版为基础,完成《近代晶体学》一书的撰写工作.

《近代晶体学》第二版共14章,以第一版为基础,通过补充、删改和重写,形成第二版第一至十章.

第一版与第二版第一至十章阐述的研究对象都是具有周期性结构的晶体,但后者涉及的研究对象被拓宽,不仅阐述一般的无机物、低分子质量的有机物、络合物等晶体的生长、结构、性质及其应用等,而且重点、概括性地阐述和描绘极其复杂多变的非生物和生物聚合物晶体的结构、生长等.近代晶体学日益朝着更深层次的研究方向发展,表明所要解决的研究课题是本学科存在的科学难题.典型的实例包括蛋白质类晶体的生长、结构、功能性质及其相互联系等.对于此类科学难题,哪怕是获得部分有进展的研究成果,不论是当前、长远,都是人们极其需要的珍贵科学财富.

第二版第一至十章与第一版相比,在所包含的章节先后次序与其内涵方面做了合理系统的调整与安排,以便更易于理解近代晶体学发展的历史进程与发展全貌.第二版新增第十一至十四章,论述四种不同类型的晶体,它们都是由近代晶体学理论框架及其运用的类同研究工具引申出来,各有特点.现在分别简要地加以言明:

(1) 磁晶:磁晶是带有磁性的晶体.磁晶最显著的特点是具有双重对称性,这类晶体不仅具有晶体学对称群——点群、平移群和空间群,而且具有磁对称群——磁点群、磁平移群和磁空间群.这两种对称性理论密切相关,但又不同.同一种晶体学对称群可引申出相应的几个甚或数十个不同的磁对称群.

(2) 准晶: 准晶是准晶体的简称, 存在三种类型:

一维准晶: 在所占有的三维空间中, 原子排列规律在二维方向是周期性的, 在另外一维方向呈准周期性分布。

二维准晶: 在所占有的三维空间中, 原子排列规律在一维方向是周期性的, 在另外二维方向呈准周期性分布。在二维准晶中, 由两个准周期方向形成的原子平面在其法线方向的原子排列是周期性的。实际上已发现, 二维准晶有 5 次、8 次、10 次和 12 次旋转轴准晶。二维准周期平面的特征可以用具有周期性的旋转对称轴来表征。

三维准晶: 在所占有的三维空间中, 原子排列规律在三维方向都是准周期性的。

(3) 纳米晶: 纳米晶是纳米晶体的简称, 是在一定的环境条件下生成的具有特殊形态和特殊原子数目的纳米级微小晶体。纳米晶的表面原子数占有率远远大于相应块状晶体的表面原子数占有率, 从而产生一系列特殊效应。

(4) 液晶: 液晶是处于液态与晶态间的中间态物种, 具有液体/固体双重物性。流动性类同液体, 光学、电学和力学性质类同晶体。液晶这个名称, 在发现初期, 就是从晶体学科的角度命名的。液晶是各种各样显示器件的心脏, 在国际上, 每年都产生巨大的经济效益。当前获得广泛应用的液晶, 均是具有长棒状分子的液晶。

在第二版撰写过程中, 承蒙: 中国科学院科学出版基金资助; 北京工业大学环境与能源工程学院领导给予大力支持; 中国科学院物理研究所梁敬魁院士、清华大学化学工程系沈德忠院士积极向中国科学院科学出版基金委员会推荐; 本书第一版责任编辑——科学出版社李义发编审建议与帮助; 王希敏教授经常与作者进行有益的讨论, 及时提出建议; 常新安副教授对本书编写大纲给予协助, 并提出宝贵建议。借此机会, 对上述这些同志所付出的辛勤劳动、大力支持与帮助表示衷心的感谢。

由于作者学术水平有限, 书中内容涉及的知识面甚广, 参考文献很多, 难以全面概括, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评、指正。

张克从

2011 年 3 月

第一版丛书序

《凝聚态物理学丛书》序

以固体物理学为主干的凝聚态物理学，通过半个世纪以来的迅速发展，已经成为当今物理学中内容最丰富、应用最广泛、集中人力最多的分支学科。从历史的发展来看，凝聚态物理学无非是固体物理学的向外延拓。由于近年来固体物理学的基本概念和实验技术在许多非固体材料中的应用也卓有成效，所以人们乐于采用范围更加广泛的“凝聚态物理学”这一名称。

凝聚态物理学是研究凝聚态物质的微观结构、运动状态、物理性质及其相互关系的科学。诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学以及近期发展起来的表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等都是它的分支学科，而且新的分支尚在不断进发。还有，凝聚态物理学的概念、方法和技术还在向相邻的学科渗透，有力地促进了材料科学、化学物理学、生物物理学和地球物理学等学科的发展。

研究凝聚态物质本身的性质和它在各种外界条件(如力、热、光、气、电、磁、各种微观粒子束的辐照乃至各种极端条件)下发生的变化，常常可以发现多种多样的物理现象和效应，揭示出新的规律，形成新的概念，彼此层出不穷，内容丰富多彩，这既体现了多粒子体系的复杂性，又反映了物质结构概念的统一性。所有这一切对人们的智力提出了强有力的挑战，更重要的是，这些规律往往和生产实践有着密切的联系，在应用、开发上富有潜力，有可能开辟出新的技术领域，为新材料、元件、器件的研制和发展，提供牢固的物理基础。凝聚态物理学的发展，导致了一系列重要的技术突破和变革，对社会和科学技术的发展将产生深远的影响。

为了适应世界正在兴起的新技术革命的需要，促进凝聚态物理学的发展，并为这一领域的科技人员提供必要的参考书，我们特组织了这套《凝聚态物理学丛书》，希望它的出版有助于推动我国凝聚态物理学的发展，为我国的四化建设做出贡献。

主 编 葛庭燧
副主编 冯 端

第一版序言

当前,世界正面临着一场新技术革命.无论哪个国家,都要碰到信息、能源、材料问题.信息能反映人们的思想、社会存在和科学技术的发展等;能源既是人类生活的基础,也是每个国家的经济、科学技术发展的基础;材料是决定科学技术发展的关键之一,材料的种类和性能的优劣直接影响到科学技术发展的深度与广度.

材料之所以能够日新月异地发展,形成一门新兴学科——材料科学,在很大程度上得益于晶体在微观尺度上的结构理论所提供的知识与观点.

历史上,人们很早就发现晶体,但在早期,人们只能通过观察晶体外形去探测其组成与结构.1912年德国科学家劳厄(M. von Laue)发现晶体的X射线衍射现象以来,人们对晶体的研究经历了从宏观到微观的更深层次发展阶段,并用实验方法证明了晶体结构的几何理论和原子在晶体结构中的点阵式周期性排列等.在发现晶体的X射线衍射现象以前,物质的固体状态是各种状态中最不易处理的状态;但在发现衍射现象以后,物质的晶态成为测定其结构或原子不同层次相互作用的不可缺少的条件.

由于晶体的X射线衍射现象的发现,在晶体学中形成X射线晶体学.几十年来,通过X射线对晶体结构的测定,积累大量的结构数据,总结出原子间的键长、键角及其变异规律.分子结构的知识主要来源于X射线晶体学,特别是近年来,晶体结构的测定设备改进与发展很快,当把晶体的X射线衍射与电子计算机等新技术相结合时,晶体结构测定的精度、速度和广度大为提高,过去技术工作中的经验解法,由于有了高精度的结构数据,就可由理论计算来代替.同时,由于测定生物大分子晶体结构的效果显著提高,促成X射线晶体学与分子生物学的关系变得更密切.

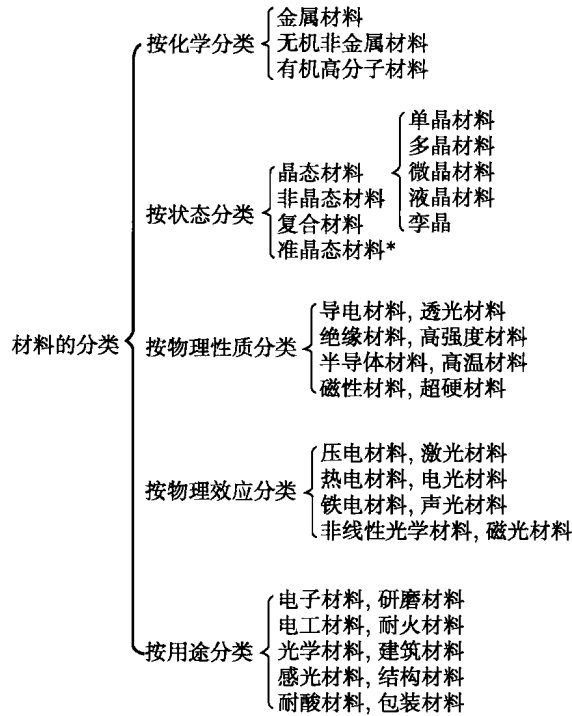
近代晶体学向化学渗透,结果形成晶体化学.它的任务在于研究化合物或单质晶体中的原子、离子的分布规律,研究晶体的组成、结构及其物理化学性质之间的联系和晶体结构的变异规律等.利用晶体化学的原理,对晶体进行改性工作,这在晶体材料的应用中有着比较重要的现实意义.

几十年来,随着近代科学技术的发展,晶体学已成为固体物理的基础,固体物理成为固体理论发展的基础.同时,用晶体制成的各种电、磁、光、热与力等敏感功能器件的应用范围越来越广,各种各样的新功能晶体材料不断涌现,所有这些都促进晶体物理的发展.

晶体的物理性能与其结构缺陷有着密切的关系,晶体结构缺陷的基础是点阵

结构,晶体结构缺陷的发生与变化等是以其所在的基质晶体结构为基础的. 晶体结构缺陷使晶体的某些动态行为(如晶体导电、扩散、生长、强度以及反应性能等)明显地偏离了理想晶态,这就是晶体结构敏感性能的来源与其关键的所在之处.

材料的种类繁多,有详细的分类. 任何一种材料,都有其组成、结构、性能及其相互关系,都有其形成的规律. 因此,对于任何一种材料,都可以采用近代晶体学的观点与方法来加以分析和处理.*



关于晶体材料的研制和发展,除对现有晶体材料进行工业生产、改进和扩大品种等外,在全世界范围内,现在的发展方向是:由研制晶体材料扩展到研制非晶态材料,由研制块状单晶材料逐渐转向研制薄膜晶体材料,由研究完整晶体转向逐渐重视研究晶体缺陷,由研究通常的晶格转向研究半导体超晶格,由简单配比组分且较易生长的晶体转向多组分、较难生长的晶体,由研究单一功能晶体转向研究多功能晶体,由研究晶体的体内性质转向研究晶体的表面性质,由研究高对称性晶体转向研究低对称性晶体. 在研究范围方面,由无机晶体扩大到一般有机晶体和有机

* 准晶态是近一两年来利用快冷技术发现的,这一新的发现将对凝聚态物理学发生重大的影响,将导致对现有的固体量子理论的重新评述. 可以预期,在不久的将来,可能研制出准晶态材料,从而导致一门新兴分支学科——准晶态材料与物理的诞生

高分子晶体等。

一般来说,晶体材料属于较贵重的材料,用量不大,但功能显著.可以肯定,近代一切尖端科学技术的发展,在很大程度上取决于晶体材料的种类、性能及其能否适应这些尖端技术不断提出的各种高、精、尖的技术要求。

生物大分子体系的结构、功能和信息是相互关联的. 20世纪50年代,逐步建立分子生物学,这要归功于生物大分子(核酸、蛋白质等)晶体结构的X射线测定结果。

晶体学既是一门比较古老的基础学科,又是一门正在发展的学科,从经典晶体学发展到近代晶体学.各学科之间相互渗透,相互促进,促进多种学科和技术的全面发展。

该书作者张克从同志多年来从事晶体学教学和晶体生长的科研工作,主编《晶体生长》^①等书.他是读者熟悉的著者之一.作者为了更好地、更快地发展晶体生长和晶体材料等学科,花费了大量的精力和时间,承担该书的编写任务,使该书得以与广大读者见面,这是一件非常令人高兴的事。

值得指出的是,作者在编写的过程中,克服重重困难,努力奋斗,终于在较短时间内完成了这项艰巨的任务,以自己的实际行动为振兴中华作贡献,这种精神令人钦佩。

吴乾章

1985年8月

^①张克从,张乐溥主编.晶体生长.科学出版社,1981

目 录

第二版前言

第一版丛书序

第一版序言

第一章 晶体与近代晶体学	(1)
§ 1.1 晶体	(1)
1.1.1 晶体与非晶体相比, 晶体所具有的基本性质	(1)
1.1.2 天然晶体与人工晶体	(2)
1.1.3 晶体内涵的拓宽	(4)
§ 1.2 近代晶体学	(5)
1.2.1 经典晶体学	(6)
1.2.2 X 射线晶体学	(6)
1.2.3 晶体生长科学与技术	(7)
1.2.4 非周期性晶体学	(10)
1.2.5 纳米晶体学	(10)
1.2.6 蛋白质晶体学	(10)
§ 1.3 近代晶体学与其他主要相关学科的联系	(11)
参考文献	(11)
第二章 晶体结构周期性点阵描述	(14)
§ 2.1 晶体点阵	(14)
2.1.1 晶体点阵结构理论发展的简要历史回顾	(14)
2.1.2 点阵的类型	(15)
2.1.3 点阵的矩阵表示	(19)
2.1.4 点阵对晶体对称轴轴次的限制	(20)
2.1.5 点阵的方向指数	(21)
2.1.6 三维空间点阵的平面指数	(25)
2.1.7 三方及六方晶体的四轴坐标系平面指数	(26)
2.1.8 晶体结构的有序性问题	(28)
§ 2.2 倒易点阵	(29)
2.2.1 倒易点阵的定义	(29)

2.2.2	倒易点阵的基本性质	(32)
2.2.3	倒易矢量在晶体学中的应用	(35)
2.2.4	二维倒易点阵的平面类型	(38)
	参考文献	(40)
第三章	晶体对称性理论	(42)
§ 3.1	对称性概念	(42)
3.1.1	对称性定义	(42)
3.1.2	对称操作与对称元素	(43)
3.1.3	对称变换	(43)
§ 3.2	群论基础	(44)
3.2.1	群 G 的基本性质(又称群的公理)	(44)
3.2.2	群 G 的乘法表	(45)
3.2.3	群 G 的一些基本概念	(48)
§ 3.3	32 种晶体学点群	(54)
3.3.1	晶体的宏观对称元素	(55)
3.3.2	晶体宏观对称元素的组合	(57)
3.3.3	32 种晶体学点群	(60)
§ 3.4	14 种晶体学平移群	(80)
3.4.1	空间点阵类型与晶系的关系	(80)
3.4.2	14 种布拉维点阵型式	(81)
3.4.3	约化胞理论	(84)
§ 3.5	230 种晶体学空间群	(85)
3.5.1	晶体的微观对称元素	(85)
3.5.2	晶体微观对称元素的组合	(87)
3.5.3	点群与空间群的同形性	(90)
3.5.4	推引晶体学空间群	(91)
3.5.5	空间群符号	(95)
3.5.6	等效点系	(96)
3.5.7	一些常用技术晶体的空间群	(97)
§ 3.6	一维和二维对称群	(100)
3.6.1	一维对称群	(100)
3.6.2	二维对称群	(100)
§ 3.7	二色群和准晶对称群	(104)
3.7.1	二色群:既考虑到晶体的位置对称性,又考虑到晶体的状态对称性	(104)

3.7.2 准晶对称群	(106)
参考文献	(106)
第四章 晶体形态学	(108)
§ 4.1 晶体形态学中的几个经典性定律	(108)
§ 4.2 晶面角的测量与投影	(111)
4.2.1 晶面角的测量	(112)
4.2.2 晶体的投影	(113)
§ 4.3 晶体的理想形态	(116)
4.3.1 晶体的单形	(116)
4.3.2 47 种单形在 32 种点群中的分布	(117)
4.3.3 晶体的聚形	(122)
§ 4.4 几种预测性晶体形态理论模型	(123)
4.4.1 BFDH 理论模型	(123)
4.4.2 AE 理论模型	(124)
4.4.3 最小表面能理论模型	(124)
4.4.4 PBC 理论模型	(124)
4.4.5 配位多面体生长基元理论模型	(125)
§ 4.5 实际晶体生长形态	(126)
4.5.1 晶体的生长习性	(126)
4.5.2 晶体生长的二型性与多型性	(127)
4.5.3 类质同象与类质多象	(128)
4.5.4 双晶	(129)
§ 4.6 生长环境相对晶体生长形态的影响	(134)
§ 4.7 晶体形态稳定性与晶体表面	(137)
4.7.1 晶体形态稳定性	(137)
4.7.2 晶体表面	(138)
§ 4.8 计算机模拟晶体形态	(139)
§ 4.9 当前研究晶体形态的意义与作用	(141)
参考文献	(142)
第五章 晶体的衍射效应与其应用	(144)
§ 5.1 晶体的衍射效应	(144)
5.1.1 X 射线源与 X 射线性质	(144)
5.1.2 X 射线衍射几何学	(146)
5.1.3 晶体对 X 射线衍射的影响	(150)
5.1.4 X 射线数据的收集方法	(159)

5.1.5	电子衍射和中子衍射	(164)
§ 5.2	晶体衍射效应的应用	(171)
5.2.1	X 射线对晶体结构的测定	(171)
5.2.2	X 射线形貌术	(172)
5.2.3	晶胞常数的精确测量	(172)
5.2.4	物相的 X 射线衍射分析	(174)
5.2.5	结晶相图的 X 射线测量	(175)
5.2.6	电子衍射与中子衍射的应用	(178)
	参考文献	(180)
第六章	晶体结构的形成	(182)
§ 6.1	原子结构	(182)
6.1.1	原子核外电子的运动状态	(182)
6.1.2	量子数与轨道	(183)
6.1.3	电子云的分布	(185)
6.1.4	原子的电子排布	(185)
6.1.5	原子的电离能、电子亲和能及电负性	(190)
§ 6.2	晶体的键型	(192)
6.2.1	离子键	(192)
6.2.2	共价键	(199)
6.2.3	金属键	(208)
6.2.4	范德瓦耳斯键	(211)
6.2.5	氢键	(215)
6.2.6	中间型(混合型)键	(219)
§ 6.3	无机晶体结构形成原理	(221)
6.3.1	球紧密堆积原理	(222)
6.3.2	鲍林规则	(224)
6.3.3	晶体结构中的配位多面体	(224)
6.3.4	无机晶体形成的一些经验规律	(226)
§ 6.4	有机晶体结构形成原理	(227)
6.4.1	有机分子的结构	(227)
6.4.2	有机分子的对称性	(230)
6.4.3	晶体结构中有机分子的堆积	(230)
6.4.4	有机晶体结构在空间群中的分布	(231)
§ 6.5	晶体场理论与配位场理论	(231)
6.5.1	晶体场理论	(231)

6.5.2 配位场理论	(233)
§ 6.6 晶体工程简介	(234)
参考文献	(236)
第七章 晶体结构	(238)
§ 7.1 晶体结构的主要类型	(238)
§ 7.2 元素单质的晶体结构	(239)
7.2.1 金属单质的晶体结构	(239)
7.2.2 稀有气体的晶体结构	(240)
7.2.3 非金属单质的晶体结构	(240)
§ 7.3 金属合金的晶体结构	(242)
7.3.1 金属固溶体	(242)
7.3.2 金属间化合物	(243)
7.3.3 电子化合物	(244)
7.3.4 非周期性结构的固相合金	(245)
§ 7.4 无机化合物典型的晶体结构	(245)
7.4.1 二元化合物典型的晶体结构	(245)
7.4.2 多元化合物典型的晶体结构	(254)
7.4.3 新型功能晶体结构举例	(281)
§ 7.5 有机化合物典型的晶体结构	(287)
7.5.1 六次甲基四胺晶体结构	(287)
7.5.2 尿素的晶体结构	(287)
7.5.3 苯基脲的晶体结构	(288)
7.5.4 硫酸三甘肽的晶体结构	(289)
7.5.5 L-精氨酸磷酸盐晶体	(290)
7.5.6 2,4-二硝基苯丙氨基甲酯晶体	(290)
7.5.7 2-甲基-4-硝基苯胺晶体	(291)
§ 7.6 聚合物分子结构与晶体结构	(291)
7.6.1 非生物聚合物	(292)
7.6.2 生物聚合物	(295)
参考文献	(301)
第八章 晶体的物理性质	(304)
§ 8.1 张量的基础知识	(304)
8.1.1 张量的定义	(304)
8.1.2 张量的变换定律	(307)
§ 8.2 晶体对称性对晶体物理性质的影响	(310)

8.2.1	诺依曼原则	(310)
8.2.2	晶体的对称性对其物理性质的影响	(311)
§ 8.3	晶体的力学性质	(314)
8.3.1	晶体的应力与应变	(314)
8.3.2	晶体的弹性和范性	(319)
8.3.3	晶体的解理性	(321)
8.3.4	晶体的硬度	(322)
8.3.5	晶体的热膨胀	(323)
§ 8.4	晶体的介电性质	(325)
8.4.1	电极化	(326)
8.4.2	晶体的介质极化率和介电常数	(326)
8.4.3	极化弛豫和介质损耗	(327)
§ 8.5	晶体的压电性质	(329)
8.5.1	压电系数	(329)
8.5.2	电致伸缩效应	(331)
8.5.3	压电晶体及其应用	(331)
§ 8.6	晶体的热释电性质	(333)
8.6.1	热释电晶体的对称性特点	(333)
8.6.2	热释电探测器对晶体材料的要求	(334)
8.6.3	热释电晶体及其应用	(336)
§ 8.7	晶体的铁电性质	(338)
8.7.1	铁电晶体的电滞回线	(339)
8.7.2	铁电晶体的居里温度 T_C	(340)
8.7.3	铁电相变(铁电体)的两种主要类型	(341)
8.7.4	铁电晶体的主要类型	(342)
8.7.5	介电晶体、压电晶体、热释电晶体和铁电晶体 两者间对称性的相互联系	(342)
§ 8.8	晶体的线性光学性质	(343)
8.8.1	晶体光学基础	(343)
8.8.2	光波在晶体中的传播特性	(344)
8.8.3	晶体中的双折射现象	(345)
8.8.4	光率体和折射率面	(346)
8.8.5	晶体折射率的色散	(353)
§ 8.9	晶体的非线性光学性质	(354)
8.9.1	晶体的非线性电极化	(354)

8.9.2	晶体的二阶非线性光学系数(倍频系数)·····	(356)
8.9.3	晶体的相位匹配·····	(358)
8.9.4	非线性光学晶体材料·····	(359)
§ 8.10	晶体在外场作用下的光学性质·····	(361)
8.10.1	晶体的电光效应·····	(361)
8.10.2	晶体的弹光效应·····	(370)
8.10.3	晶体的声光效应·····	(371)
8.10.4	晶体的热光效应·····	(374)
8.10.5	晶体的光折变效应·····	(376)
	参考文献·····	(377)
第九章	晶体生长 ·····	(380)
§ 9.1	相变与相图·····	(381)
9.1.1	相变·····	(381)
9.1.2	相图·····	(381)
§ 9.2	相变的驱动力·····	(385)
9.2.1	气体-晶体体系·····	(385)
9.2.2	溶液-晶体体系·····	(386)
9.2.3	熔体-晶体体系·····	(386)
§ 9.3	晶体的成核理论·····	(388)
9.3.1	均匀成核的经典理论·····	(388)
9.3.2	非均匀成核理论·····	(391)
§ 9.4	晶体生长的输运过程与边界层理论·····	(394)
9.4.1	晶体生长的输运过程·····	(394)
9.4.2	边界层理论·····	(396)
§ 9.5	晶体生长界面结构理论模型·····	(402)
9.5.1	光滑界面理论模型·····	(402)
9.5.2	螺旋位错理论模型·····	(403)
9.5.3	粗糙界面理论模型·····	(403)
9.5.4	扩散界面理论模型·····	(404)
9.5.5	蛋白质晶体生长的微观模型·····	(405)
§ 9.6	晶体生长动力学·····	(406)
9.6.1	光滑界面的生长·····	(407)
9.6.2	螺旋位错生长·····	(409)
9.6.3	粗糙界面的生长·····	(410)
9.6.4	扩散界面的生长·····	(411)

9.6.5	蛋白质晶体生长	(412)
9.6.6	蒙特卡罗法模拟晶体生长	(413)
§ 9.7	单晶体生长方法	(415)
9.7.1	从熔体中生长单晶体	(415)
9.7.2	从溶液中生长单晶体	(418)
9.7.3	高温溶液法生长单晶体	(421)
9.7.4	热液法晶体生长	(424)
9.7.5	从气相中生长单晶体	(426)
9.7.6	高温高压法	(427)
§ 9.8	晶体薄膜	(428)
9.8.1	晶体薄膜生长方法	(428)
9.8.2	晶体薄膜的形成、结构与其性质	(433)
9.8.3	薄膜材料的主要类型与其应用	(433)
§ 9.9	有机功能晶体与其生长	(435)
	参考文献	(437)
第十章	晶体缺陷	(440)
§ 10.1	晶体缺陷的基本类型	(440)
10.1.1	晶体的点缺陷	(440)
10.1.2	晶体的线缺陷	(447)
10.1.3	晶体的面缺陷	(452)
10.1.4	晶体的体缺陷	(456)
§ 10.2	晶体缺陷的观测方法与技术	(459)
10.2.1	晶体成分分析	(459)
10.2.2	位错的光学观察	(460)
10.2.3	X 射线衍射形貌术, 简称 X 射线形貌术	(462)
10.2.4	电子显微术	(468)
	参考文献	(472)
第十一章	磁晶与磁群	(474)
§ 11.1	磁晶	(474)
11.1.1	常用的磁学名词和单位	(475)
11.1.2	磁晶的分类	(476)
11.1.3	强磁性晶体的磁的各向异性	(480)
11.1.4	磁畴	(482)
11.1.5	磁晶的磁滞性质	(485)
11.1.6	磁晶的剩余磁化	(486)