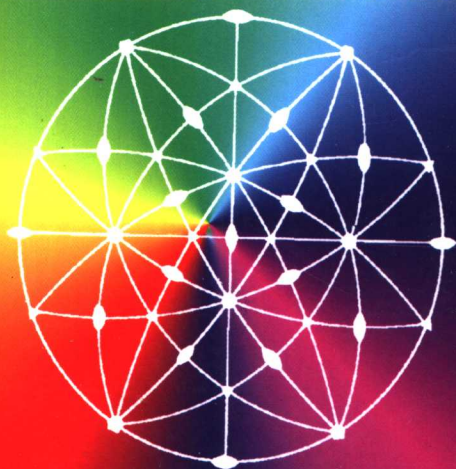


凝聚态物理学丛书

准晶物理学

王仁卉 胡承正 桂嘉年 著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书在阐述准晶物理学基本知识和基本理论的同时,突出地介绍了作者及其课题组在准晶物理学的开创性研究中所取得的主要成就。全书10章,主要叙述准晶材料及其制备;准晶点阵的切割投影法描述;准晶的原子结构;准晶体的对称操作和对称群;准晶体平衡性质热力学及物理性质张量;准晶的线弹性理论;准晶的电子结构和物理性能;准晶近似相和准晶相变;晶体与准晶的热漫散射理论;准晶中的结构缺陷。书末附录A至附录E列举了有关准晶点群的特征标,准晶的应变张量不变量,以及准晶的物理性能张量的具体形式。附录F则为本书三位作者和武汉大学准晶研究课题组所发表的有关准晶研究的主要论文目录。

本书可供从事准晶材料、准晶物理学和晶体物理学的科研、教学、开发、应用的科技工作者参阅,也可作为大专院校有关专业研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

准晶物理学/王仁卉,胡承正,桂嘉年著. —北京:科学出版社,2004

(凝聚态物理学丛书/葛庭燧主编)

ISBN 7-03-011718-2

I. 准… II. ①王… ②胡… ③桂… III. 准晶体—晶体物理学

IV. O753

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第059355号

责任编辑:李义发 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年8月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2004年8月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—2 500 字数:423 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《凝聚态物理学丛书》出版说明

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属于它的分支学科,而且新的分支尚在不断迸发。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,这些既体现了多粒子体系的复杂性,又反映了物质结构概念上的统一性。所有这一切不仅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发生深远的影响。

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》,希望它的出版将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

序

晶体中的原子位置具有三维周期性,因而具有长程平移序. 受到具有周期性的限制,晶体的长程取向序只允许 1,2,3,4,6 次旋转对称,不允许 5 次及 7 次以上的旋转对称. 一个简单的例子就是不能用正五边形的地砖铺满地面而不留空隙. 自从 Laue 在 1912 年发现晶体的 X 射线衍射(后来还有电子衍射及中子衍射)和 Bragg 父子用它测定晶体中的原子位置以来,成千上万个晶体结构无一违反上述旋转对称定则. 因此,当 Shechtman 等在 1984 年底宣布在急冷的 Al-Mn 合金中观察到具有二十面体长程取向序(二十面体有六支 5 次旋转对称轴,十支 3 次轴,十五支 2 次轴)的合金相后,立即在固体科学界产生很大的震动. 有的科学周刊报道此一发现的标题竟是“晶体学的瓦解”. 晶体学的泰斗、诺贝尔化学奖得主 Pauling 也拒绝接受 5 次旋转对称,并称它是“Non-sense”. 但 Shechtman 等将其观察到的合金相解释为具有长程准周期(quasiperiodicity)平移序的合金相,这并未违背“周期性的晶体不可能具有 5 次或 7 次以上旋转对称”的法则. 问题在于过去人们把周期性与长程平移序完全等同,没有想到还有准周期的平移序. 接着人们又在一些急冷的合金相中发现了 8 次、10 次和 12 次旋转对称,它们也都具有准周期的长程平移序,但无周期性. 准晶(quasicrystal)就是准周期性晶体(quasiperiodic crystal)的简称. 迄今除了在近两百种合金中外,还在 Ta 的碲化物中发现准晶. 有些二元和三元准晶还是热力学的稳定相,出现在二元和三元平衡图中. 人们还用提拉法、Bridgman 法制备出来的 Al-Pd-Mn, Al-Li-Cu, Zn-Mg-Ho, Al-Cu-Fe 等二十面体准晶大单晶, Al-Co-Ni, Al-Co-Cu, Zn-Mg-Dy 等 10 次准晶大单晶. 此外,在一些工业铝合金、镁合金、不锈钢耐热钢等的长期使用过程中还会有准晶析出现象. 因此可以说,准晶的出现不但没有使晶体学瓦解,反而丰富了晶体学的内容,扩大了它的范畴.

在三维周期性晶体中,描述其中原子的位置的矢量(位矢)以及描述原子的位移的位移矢量都是三维空间的矢量.对于准晶,在每个准周期方向至少要用两个基矢描述原子的位置.因此,在二十面体准晶中要用6个基矢($N=6$)描述原子的位置.准晶的物理学和晶体学工作者,往往把 d 维空间的准晶描述为由 N 维($N>d$)空间晶体被 d 维物理空间切割而得到.二十面体准晶的长程位移序在三维空间中是准周期性的,但在六维空间中就是周期性的了.这样,在六维空间中处理准晶的晶体学问题就简便多了.但是在六维空间中,还有一个 $N-d=3$ 维的赝空间(又称补空间或垂直空间),因此六维位矢 $\mathbf{R}$ 还有一个分量 $\mathbf{r}^\perp$.同理,六维空间中的位移矢量 $\mathbf{U}$ 也可分解为平行空间分量 $\mathbf{u}$ 和垂直空间分量 $\mathbf{w}$: $\mathbf{U}=\mathbf{u}+\mathbf{w}$,前者称为声子(phonon)型位移,后者称为相位子(phason)型位移.

因此,准晶的原子结构的描述,准晶衍射花样的运动学理论计算,准晶的对称性(包括点群和空间群)和群论,准晶涉及的相位子应变的物理性能(例如弹性,压电效应等),以及准晶的热漫散射理论,不但要考虑声子型,还要考虑相位子型位移的影响,从而要比晶体中的情况更为复杂.此外,准晶中某些特殊的线性相位子应变所引起的原子的跳动,使准晶转变成结构与其类似的晶体相.

早期的准晶都是在急冷合金中发现的,颗粒小(微米晶或纳米晶),又常有其他合金相并存,因此使用透射电子显微镜(包括微米或纳米电子衍射)就成为确认准晶和研究其晶体学特征(旋转对称和准周期性)的主要手段.本书主要作者王仁卉教授,作为凝聚态物理和材料物理的实验工作者,在合金学、晶体学和电子显微学三方面均有很深造诣,因此在准晶研究初期就把电子衍射的动力学理论和会聚束电子衍射用于准晶研究.本书第二作者胡承正教授,作为理论物理学工作者,在群表示理论和电子理论等方面学具有专长.本书第三作者桂嘉年教授则专长于材料物理基本理论和相关的实验技术.王仁卉领导的科研课题组,在准晶的高维晶体学、对称群、物理性能张量、位错 Burgers 矢量的实验鉴定、位错的弹性理论等方面发表了一系列高水平的学术论文.特别是在准晶中的位错研究方面,始终处于国际研究前沿,有不少创新性研究成果.正因为如此,王仁卉教授多次应邀在国际准晶学术会议上作

专题报告. 王仁卉、胡承正应 Reports on Progress in Physics 学报主编的邀请, 撰写的“准晶中的对称群、物性张量、弹性和位错 [Symmetry groups, physical property tensors, elasticity and dislocations in quasicrystals, Rep. Prog. Phys., 2000 (63): 1~39]”综述已在三年前发表. 他们应 Westbrook J H 和 Fleischer R L 两位主编的邀请为《金属间化合物》第 3 卷 (Intermetallic Compounds, Vol. 3, Progress) 撰写了“准晶中的位错 (Dislocations in Quasicrystals)”一章 (该书已由 John Wiley & Sons 出版社于 2002 年出版).

本书在阐述准晶物理学的有关基本知识和基本理论的同时, 也总结了王仁卉教授和他领导的武汉大学准晶研究小组多年研究的主要成果. 选材上, (1) 较多侧重于准晶晶体学, 包括准晶点阵和准晶原子模型的切割-投影法描述, 准晶的晶系、点群和空间群的分类, 群表示论在准晶中的应用等. (2) 在准晶的物理性能方面, 有一章介绍准晶的电子结构及相关的物理性能. 更多的篇幅则用于介绍准晶的弹性, 以及与准晶弹性密切相关的准晶的热漫散射理论, 还有采用实验测定的准晶热漫散射强度在倒易空间的分布而拟合出准晶弹性常数这方面的初步工作. (3) 在准晶原子结构缺陷方面, 本书综述了在准晶中引入线性相位子应变而形成的结构类似准晶的晶体相的理论以及有关的实验结果, 详细地介绍了他们在准晶中位错的弹性理论方面的开创性研究成果, 并简单概述了准晶中的面缺陷 (包括层错、小角晶界、孪晶、反相畴壁、公度错等) 的实验鉴定方面的结果.

本书深入浅出、雅俗共赏. 既注重通俗易懂地阐述新概念, 又力求把读者带到准晶研究的最前沿. 具有材料科学或物理学本科毕业的基础并对准晶有兴趣的读者, 通过努力, 都可看懂. 愿向广大材料科学、凝聚态物理和晶体学工作者推荐, 是为序.

郭可信

前 言

准晶是 1984 年新发现的具有与晶体和非晶玻璃态不同的结构的新的凝聚态物质. 此前, 人们通常认为, 固态物质只有晶态和非晶态两种结构类型. 晶体的基本特征是原子排列具有周期性, 具有长程平移序. 而非晶态的基本特征是原子排列只具有短程序, 长程则是无序的. 晶体的周期性决定了它的长程取向有序仅仅可能具有二次、三次、四次和六次的旋转对称性, 而不可能有五次、七次和其他旋转对称性. 准晶不同于非晶, 它具有长程平移序和取向序. 在具有长程平移序和取向序这一方面, 准晶同晶体是一样的. 他们的差别在于, 晶体具有周期性, 而准晶则没有周期性, 准晶具有准周期性. 正是因为准晶没有周期性, 其旋转对称性也就不限于二次、三次、四次和六次, 可以有五次、八次、十次、十二次等等旋转对称性. Schechtman 等于 1984 年在急冷的 Al-Mn 合金中观察到具有二十面体对称性的准晶. 二十面体准晶的旋转对称性中, 除了二次和三次对称性之外, 就包含有五次对称性.

对于具有周期性的 d ($d=1, 2, 3$) 维空间的晶体, 描述其中原子的位置的矢量(位矢), 以及描述原子的位移的位移矢量, 也是 d 维空间的矢量. 准晶物理学工作者和准晶晶体学工作者, 往往把 d 维空间的准晶描述为由 N 维 ($N>d$) 空间晶体被 d 维物理空间切割而得到. 因此, 对于具有准周期性的 d ($d=1, 2, 3$) 维空间的准晶体, 描述其中原子的位置的位矢, 以及描述原子的位移的位移矢量, 则需要用 N ($N>d$) 维空间的矢量来描述. 例如, 对于二十面体准晶, 位矢和位移矢量都需要用 $N=6$ 维空间的矢量描述. 一个 N 维空间的位矢 $\mathbf{R}$ 可以分解为 d 维的物理空间(平行空间)矢量 $\mathbf{r}^{\parallel}$ 和 $(N-d)$ 维的垂直空间矢量 $\mathbf{r}^{\perp}$ 两部分: $\mathbf{R} = \mathbf{r}^{\parallel} + \mathbf{r}^{\perp}$, 其

中物理空间的分量 $r^{\parallel}$ 就是准晶中原子的位矢. 一个 N 维空间的位移矢量 U 可以分解为 d 维的物理空间(平行空间)位移矢量 u 和 $(N-d)$ 维的垂直空间位移矢量 w 两部分: $U = u + w$. 其中物理空间的分量 u 描述准晶中原子的位置的移动, 这一类位移可以是连续变化的, 文献上称之为声子型位移. 垂直空间位移矢量 w 描述准晶中原子向其近邻的另一个亚稳平衡位置的跳动, 这一类位移在文献上称之为相位子型位移. 这是因为, 高维空间的原子是沿着垂直空间的方向拉长的, 具有一定的形状, 沿垂直空间的位移 w 将会导致某些原来被物理空间切割的原子, 例如处于位矢为 $R = r^{\parallel} + r^{\perp}$ 的原子, 移到了 $R + w = r^{\parallel} + (r^{\perp} + w)$ 处, 不再能够被切割, 而另一些原来没有被切割的原子, 例如其近邻的处于位矢为 $R + \Delta R = (r^{\parallel} + \Delta r^{\parallel}) + (r^{\perp} + \Delta r^{\perp})$ 的原子, 则移动到 $R + \Delta R + w = (r^{\parallel} + \Delta r^{\parallel}) + (r^{\perp} + \Delta r^{\perp} + w)$ 处而能够被切割了. 换句话说, 原子从位矢为 $r^{\parallel}$ 的一个位置跳到了位矢为 $(r^{\parallel} + \Delta r^{\parallel})$ 的另一个位置.

因此, 准晶的原子结构的描述, 准晶衍射花样的运动学理论计算, 准晶的对称性和群论, 包括点群和空间群, 准晶所涉及的相位子应变的物理性能, 例如弹性, 压电效应等, 以及准晶的热漫散射理论等都与晶体不完全相同, 且更为复杂. 此外, 准晶中某些特殊的线性相位子应变所引起的原子的跳动, 使准晶转变成其近似晶体相(近似相). 在一定的条件下, 准晶可以转变成近似相. 在中国科学院郭可信院士的关心、鼓励、指导和帮助下, 武汉大学物理系准晶研究小组, 包括本书的三名作者, 还有丁棣华教授, 邹化民教授, 戴明星教授, 以及先后在本课题组攻读博士学位或者在其攻博期间与本课题组师生密切合作的王洲光博士, 鄢炎发博士, 冯江林博士, 杨文革博士, 杨湘秀博士, 雷建林博士, 王建波博士, 赵东山博士等, 在国家自然科学基金委员会先后八个项目的资助下, 从事准晶研究 17 年. 研究过程中有许多实验工作是在中国科学院北京电子显微镜实验室完成的, 还有些工作是在日本国北海道大

学高桥平一郎教授的超高压电镜与离子辐照联机装置、在德国 Juelich 研究中心 K. Urban 教授的微结构研究所、在法国国家研究中心下属的晶体生长机制研究中心 Gastaldi 研究员的实验室并通过他在欧洲同步辐射装置 X 射线形貌站合作完成的. 主要的成果如下:

(1) 准晶中缺陷的观察与鉴定. 这包括两方面: 一是开发出了新的, 或改进并完善了其他研究者已经采用过的运用透射电子显微镜实验鉴定全位错的 Burgers 矢量 $\mathbf{B} = \mathbf{b}^{\parallel} + \mathbf{b}^{\perp}$ 的技术. 计有: (a) 开发出了鉴定孤立的、与试样薄膜斜交的、全位错的 Burgers 矢量的离焦会聚束电子衍射 (CBED) 技术; (b) 改进并完善了鉴定全位错的 Burgers 矢量的衍射衬度法; (c) 开发出了鉴定近乎垂直于试样薄膜的、全位错的 Burgers 矢量的高分辨点阵条纹技术. 二是采用这些实验技术对准晶中位错及其特征进行了大量的实验研究. 主要成果有: (a) 采用离焦 CBED 技术鉴定出二十面体准晶和十次准晶中位错具有的一系列的 Burgers 矢量 $\mathbf{B} = \mathbf{b}^{\parallel} + \mathbf{b}^{\perp}$, 它们在平行空间中的分量 $\mathbf{b}^{\parallel}$ 都平行于某一个方向, 例如某支二次轴, 但其垂直分量 $\mathbf{b}^{\perp}$ 与平行分量 $\mathbf{b}^{\parallel}$ 的长度之比 $|\mathbf{b}^{\perp}|/|\mathbf{b}^{\parallel}|$ 却不同. (b) 采用衍射衬度法在 Al-Mn-Si 和 Al-Pd-Mn 二十面体准晶中鉴定出小位错圈.

(2) 准晶晶体学及准晶物理性能张量. 在荷兰著名的准晶晶体学家 T. Janssen 推导准晶点群工作的基础之上, 完善了关于二维准晶和一维准晶的晶系、Laue 类、点群和空间群的分类. 把晶体平衡物理性能热力学推广到准晶, 并应用群表示理论, 推导出各种 Laue 类准晶的应变张量不变量, 进而推导出各 Laue 类准晶独立弹性常数的个数以及在常用坐标系中弹性常数张量的具体的形式.

(3) 准晶以及准晶中位错的线弹性理论. 把晶体中相应的理论, 包括计算长直位错线周围应变场和应力场的 Eshelby 法和 Stroh 法, 推广到准晶的情况, 并就某些特殊方向的长直位错线的弹性场推导出了解析表达式.

(4) 准晶的热漫散射理论和准晶弹性常数的热漫散射法测定. 完善并改进了 Jaric 和 Nelson 提出的准晶的热漫散射理论, 纠正了他们在处理相位子位移场冻结的效应时由于考虑不周而造成的计算公式中的错误, 并推导了计算二维准晶的热漫散射强度的公式, 计算发现, 热漫散射强度在倒空间中的分布强烈地依赖于弹性常数. 据此, 通过对 Al-Ni-Fe 十次准晶的漫散射强度分布的同步辐射 X 射线测定, 以及应用有能量过滤功能的透射电子显微镜对 Al-Pd-Mn 二十面体准晶的漫散射强度分布的电子衍射定量测定, 获得了有关其弹性常数的信息.

(5) 准晶高温塑性形变的微观机制. 与晶体塑性形变的微观机制类似, 准晶在高温的塑性形变主要是通过位错的滑移和增殖而实现的. 与晶体塑性形变的位错机制不同之处在于: 准晶中的位错运动通常是首先实现其 Burgers 矢量的声子型分量的滑移, 在位错扫过的区域留下一个相位子型的层错, 这个相位子型层错随后通过扩散而变宽, 直到消失. 现有的准晶在室温都是脆性的, 在高温才显示塑性. 因此, 原子扩散, 由于扩散而造成的位错攀移, 晶界滑移等机制也会起作用.

(6) 准晶合金的凝固过程和准晶的形成过程. 通过对 Al-Cu-Fe 二十面体准晶形成过程的研究, 发现过去被认为初生晶是 β 相的区域, 应该分成 β 相和 ϕ 相两个区域. 通过对 Al-Pd-Mn 二十面体准晶形成过程的研究, 提出了一个准晶晶粒可以在多处成核并长大的观点, 即一个准晶晶粒可以由多个畴构成, 这些畴在多处成核并长大, 但属于一个局域同晶类, 其间为相位子型畴壁.

本书在阐述准晶物理学的有关基本知识和基本理论的同时, 也总结了本课题组多年研究的主要成果. 选材上较多侧重于准晶晶体学, 包括准晶点阵和准晶原子模型的切割-投影法描述, 准晶的晶系、点群和空间群的分类, 群表示论在准晶中的应用等. 在准晶的物理性能方面, 有一章介绍准晶的电子结构及相关的物理性能, 更大的篇幅则用于介绍准晶的弹性. 由于科学出版社李义发等

同志的鼓励、帮助与耐心等待,本书得以问世.在此,我们向科学出版社,郭可信院士,国家自然科学基金委员会,中国科学院北京电子显微镜实验室,我们课题组的全体师生,以及一切帮助过我们的国内外的朋友们,表示深切的谢意.由于时间有限,本书涉及的领域较宽,错误与不妥之处在所难免,欢迎指正.

王仁卉 胡承正 桂嘉年

目 录

《凝聚态物理学丛书》出版说明

序

前言

第一章 准晶材料及其制备	(1)
§ 1.1 准晶材料及其分类	(1)
1.1.1 三维准晶	(3)
1.1.2 二维准晶	(10)
1.1.3 一维准晶	(18)
§ 1.2 稳定准晶的平衡相图	(20)
1.2.1 Al-Li-Cu 合金	(20)
1.2.2 Al-Cu-Fe 合金	(21)
1.2.3 Al-Pd-Mn 合金	(29)
1.2.4 Zn-Mg-Y 合金	(31)
1.2.5 Al-Ni-Co 合金	(34)
§ 1.3 准晶的凝固过程和晶形	(35)
1.3.1 稳定准晶的凝固过程	(35)
1.3.2 快速凝固二十面体准晶的成核与生长	(40)
1.3.3 准晶的晶体外形	(41)
参考文献	(43)
第二章 准晶点阵的切割-投影法描述	(51)
§ 2.1 高维空间晶体几何学与线性坐标变换	(51)
2.1.1 倒易点阵	(51)
2.1.2 线性坐标变换	(52)
2.1.3 度量张量和倒易度量张量	(54)
2.1.4 线性坐标变换后点对称操作矩阵和度量张量的 改变	(56)
§ 2.2 非周期结构切割投影法描述的基本概念	(58)

2.2.1	准周期结构切割投影法描述的基本概念	(58)
2.2.2	准晶的倒易点阵	(62)
2.2.3	非公度调制结构和复合结构	(69)
§ 2.3	一维准晶	(74)
2.3.1	一维准晶的切割-投影矩阵	(74)
2.3.2	准晶的结构因子	(76)
2.3.3	一维准晶的结构因子	(78)
2.3.4	一维准晶的标度特性	(79)
2.3.5	一维准晶的晶体近似相	(81)
§ 2.4	十次准晶	(85)
2.4.1	十次准晶的切割-投影矩阵	(85)
2.4.2	十次准晶的结构因子	(90)
2.4.3	十次准晶的标度特性	(93)
2.4.4	十次准晶的晶体近似相	(94)
§ 2.5	二十面体准晶	(95)
2.5.1	二十面体准晶的切割-投影矩阵	(95)
2.5.2	二十面体准晶的结构因子	(106)
2.5.3	二十面体准晶的标度特性	(109)
2.5.4	二十面体准晶衍射花样的指标化	(117)
	参考文献	(119)
第三章	准晶的原子结构	(122)
§ 3.1	二十面体准晶的原子结构	(122)
§ 3.2	十次准晶的原子结构以及准晶的原子结构的 覆盖描述法	(134)
§ 3.3	准晶衍射花样的模拟计算和准晶原子结构的 实验测定	(142)
	参考文献	(144)
第四章	准晶体的对称操作和对称群	(146)
§ 4.1	对称操作的矩阵表示及其约化	(146)
§ 4.2	$n(n=4,5,6)$ 维空间的点对称操作	(154)
§ 4.3	准晶的点对称操作	(161)
§ 4.4	一维准晶的点群和空间群	(163)
§ 4.5	二维准晶的点群和空间群	(167)

§ 4.6	三维准晶的点群与空间群	(171)
§ 4.7	准晶的点群与空间群的实验测定	(172)
	参考文献	(174)
第五章	准晶体平衡性质热力学及物理性质张量	(176)
§ 5.1	准晶体状态参量及其相互关系	(176)
§ 5.2	准晶体平衡性质的热力学关系	(179)
§ 5.3	群表示理论和张量分析的有关知识	(181)
§ 5.4	准晶物理性质张量非零独立分量个数的确定	(189)
§ 5.5	准晶物理性质张量非零独立分量的确定	(197)
5.5.1	声子和相位子应变张量表示约化的矩阵形式 ..	(198)
5.5.2	五次准晶的热膨胀系数和压电系数的独立分量的 推导	(202)
	参考文献	(205)
第六章	准晶的线弹性理论	(206)
§ 6.1	准晶弹性行为的基本特征	(206)
§ 6.2	准晶的线弹性理论	(214)
§ 6.3	二维准晶的弹性常数	(219)
§ 6.4	二十面体准晶的弹性常数以及弹性常数 与坐标系的关系	(228)
§ 6.5	各类弹性方程具体形式举例	(236)
	参考文献	(239)
第七章	准晶的电子结构和物理性能	(241)
§ 7.1	准周期系统的电子结构	(241)
7.1.1	一维准周期格点	(241)
7.1.2	三维准晶体	(248)
§ 7.2	准晶的导电性能	(249)
§ 7.3	准晶的磁性行为	(250)
§ 7.4	准晶的热性质	(254)
	参考文献	(259)
第八章	准晶近似相和准晶相变	(260)
§ 8.1	准晶近似相	(260)

§ 8.2	准晶结构相变的 Landau 理论	(262)
§ 8.3	二维准晶的结构相变	(265)
8.3.1	十次准晶	(265)
8.3.2	八次准晶	(269)
8.3.3	十二次准晶	(271)
§ 8.4	二十面体准晶的结构相变	(273)
8.4.1	对称性变化 $Y \rightarrow T$	(275)
8.4.2	对称性变化 $Y \rightarrow D_5$	(276)
8.4.3	对称性变化 $Y \rightarrow D_3$	(278)
§ 8.5	用线性相位子应变法讨论十次准晶的晶体 近似相	(281)
§ 8.6	用线性相位子应变法讨论二十面体准晶的晶体 近似相	(293)
	参考文献	(304)
第九章	晶体与准晶的热漫散射理论	(309)
§ 9.1	常用的一些数学公式	(310)
9.1.1	与 Fourier 变换和 δ 函数有关的几个公式	(310)
9.1.2	与准晶运动方程有关的若干公式	(315)
9.1.3	Gauss 积分	(317)
§ 9.2	晶体的热漫散射理论	(319)
9.2.1	理想完整晶体的衍射强度	(320)
9.2.2	有位移场的晶体的衍射强度:一般公式	(321)
9.2.3	有位移场的晶体的衍射强度:按 Boltzmann 分布 计算 $f(u)$ 的平均值	(323)
9.2.4	有位移场的晶体的衍射强度:按能量均分定理 计算 $f(u)$ 的平均值	(329)
9.2.5	有位移场的晶体的衍射强度:晶体热漫散 射强度公式的流体动力学方法推导	(332)
§ 9.3	位移场能够迅速达到平衡的准晶的热漫散射 理论	(333)
9.3.1	理想完整准晶的热漫散射理论	(334)
9.3.2	位移场达到平衡的准晶热漫散射:一般公式	(337)
9.3.3	位移场达到平衡的准晶热漫散射:按照 Boltzmann	

分布计算 $f(u)$ 的平均值	(338)
9.3.4 位移场达到平衡的准晶热漫散射:按能量均分定理 计算 $f(u)$ 的平均值	(342)
9.3.5 位移场达到平衡的准晶热漫散射:准晶热漫散射强 度公式的流体动力学方法推导	(344)
§ 9.4 相位子位移场冻结时的准晶热漫散射的一般 公式	(345)
§ 9.5 各 Laue 类准晶的流体动力学矩阵	(350)
9.5.1 准晶热漫散射强度计算公式概要	(350)
9.5.2 二十面体准晶的流体动力学矩阵	(352)
9.5.3 非晶体学对称的二维准晶的流体动力学矩阵	(361)
§ 9.6 准晶弹性常数测定的初步工作	(366)
参考文献	(371)
第十章 准晶中的结构缺陷	(373)
§ 10.1 准晶中的结构缺陷	(373)
§ 10.2 准晶位错的 Burgers 矢量和在准晶中引入位 错的 Volterra 过程	(378)
§ 10.3 准晶位错 Burgers 矢量的实验鉴定	(384)
10.3.1 准晶位错 Burgers 矢量的离焦会聚束电子衍射 鉴定	(384)
10.3.2 准晶位错 Burgers 矢量的衍衬成像法鉴定	(395)
10.3.3 准晶位错 Burgers 矢量的高分辨点阵条纹法鉴 定	(399)
10.3.4 实验鉴定准晶位错 Burgers 矢量的三种方法的 比较	(401)
§ 10.4 准晶位错的弹性模型	(402)
10.4.1 准晶位错弹性位移场的普遍表达式	(402)
10.4.2 准晶中直长位错线的弹性场	(407)
§ 10.5 准晶位错弹性场的具体计算举例	(416)
§ 10.6 准晶中的面缺陷——层错、小角晶界、孪晶、反 相畴壁、公度错	(425)
参考文献	(431)
附录A	(436)