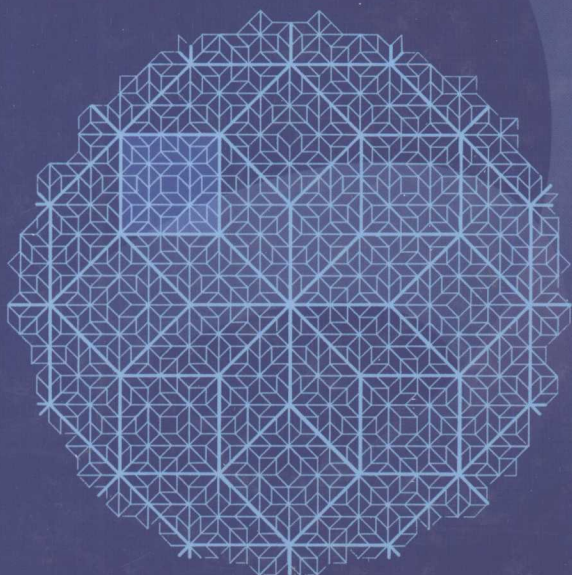


QUASIPERIODIC CRYSTALS

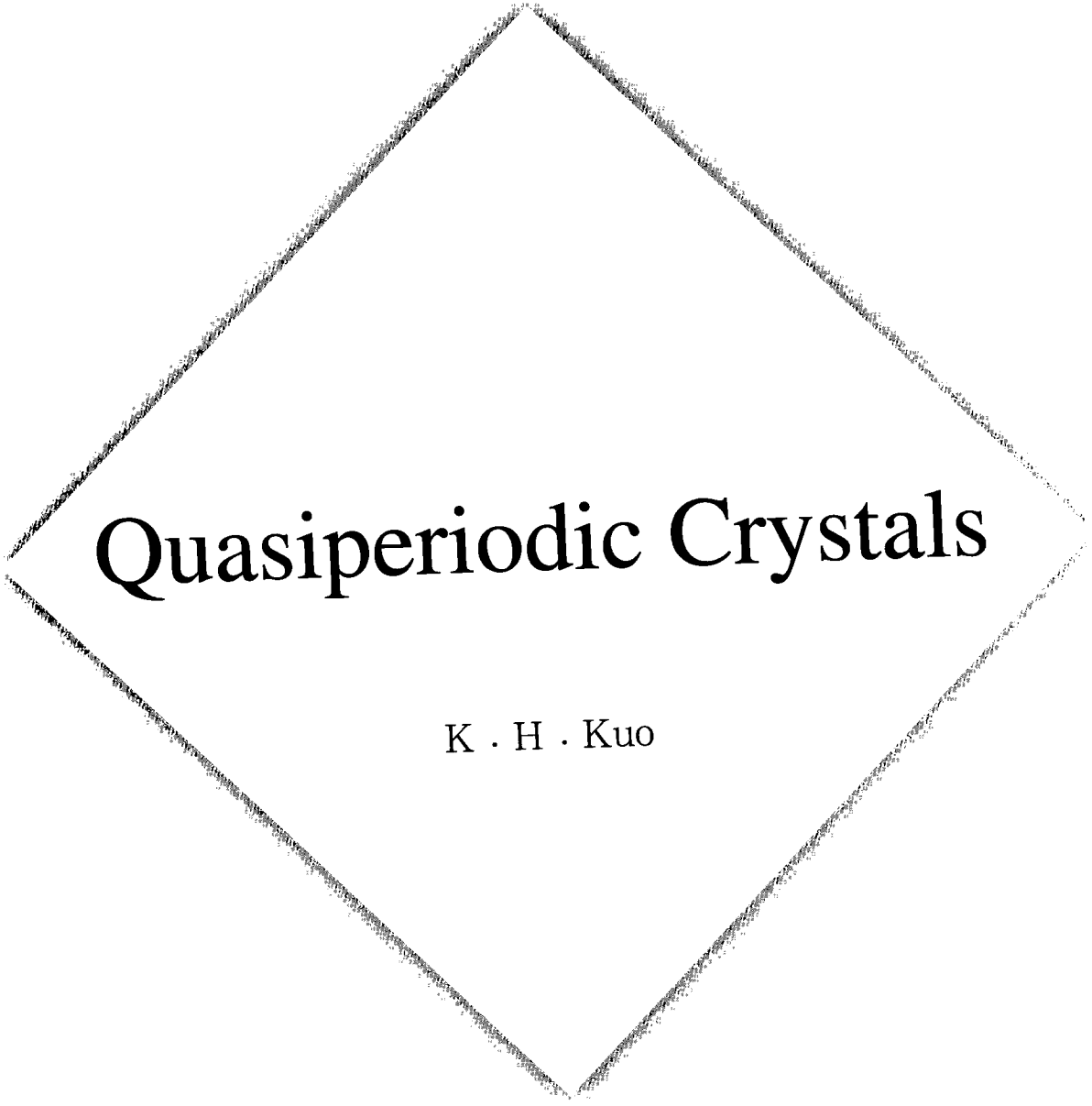
准晶研究

◆ 郭可信 著

K. H. Kuo



浙江科学技术出版社
Zhejiang Science & Technology Press



Quasiperiodic Crystals

K . H . Kuo

Zhejiang Science & Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

准晶研究/郭可信著. —杭州:浙江科学技术出版社,
2004.12

ISBN 7-5341-2545-6

I. 准... II. 郭... III. 准晶体—研究 IV. 0753

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 129370 号

准晶研究

著 者:郭可信

出 版:浙江科学技术出版社

印 刷:浙江印刷集团有限公司

发 行:浙江省新华书店

开 本:889×1194 1/16

印 张:20.75

插 页:5

字 数:510 000

版 次:2004 年 12 月第 1 版

印 次:2004 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5341-2545-6

定 价:65.00 元

责任编辑:周伟元

装帧设计:金 晖

Quasiperiodic Crystals

Zhejiang Science & Technology Press

347 Tiyyuchang Road, Hangzhou, China

@2004 by K. H. Kuo

First Published in 2004

Printed in Zhejiang Printing Group Co., Ltd.

ISBN 7-5341-2545-6



郭可信近影

郭可信，福州人，1923年8月23日生于北京。1946年毕业于浙江大学化工系，第二届公费留学去瑞典，1947-1956年在皇家理工大学及乌布撒拉大学任助教、研究员。1956-1988年任中国科学院金属研究所研究员、课题组长、室主任、副所长，1981-1990年任沈阳分院副院长、院长，1985-1993年任北京电子显微镜开放实验室主任，1996年任中国科学院物理研究所研究员。第三、第五、第六届全国人民代表大会代表。

1980年被选为中国科学院院士，1980年被选为瑞典皇家理工大学技术科学荣誉博士，同年当选为瑞典皇家工程科学院外籍院士，1990年被选为日本金属学会荣誉会员，1991年被选为印度材料学会荣誉会员。1987年获国家自然科学一等奖，1993年获第三世界科学院物理奖，1994年获何梁何利基金奖。

早年在瑞典研究合金钢中的碳化物及合金相。从1952年在Nature (170卷，245页)上发表《一种新的碳化钼》起共发表22篇论文，在1953年发表的《铬、钼和钨钢中的碳化物》(J. Iron Steel Inst., 173卷：363页)迄今已被引用134次，论文发表40多年后还在1992-2000年间被引用20次。

1984年开始准晶的合金学和晶体学研究，已在国外发表161篇论文，其中10篇论文的总引用次数接近1200次。郭可信等的主要贡献有：

1. 在四面体密堆晶体 (Frank-Kasper相) 的电子衍射图中观察到五重对称的强电子衍射斑点，并给予正确的诠释 (Ultramicroscopy, 1985 (16): 273);

2. 独立地在Ti-Ni合金中发现具有五重旋转对称的三维准晶 (Philos. Mag. A, 1985 (52): L49);

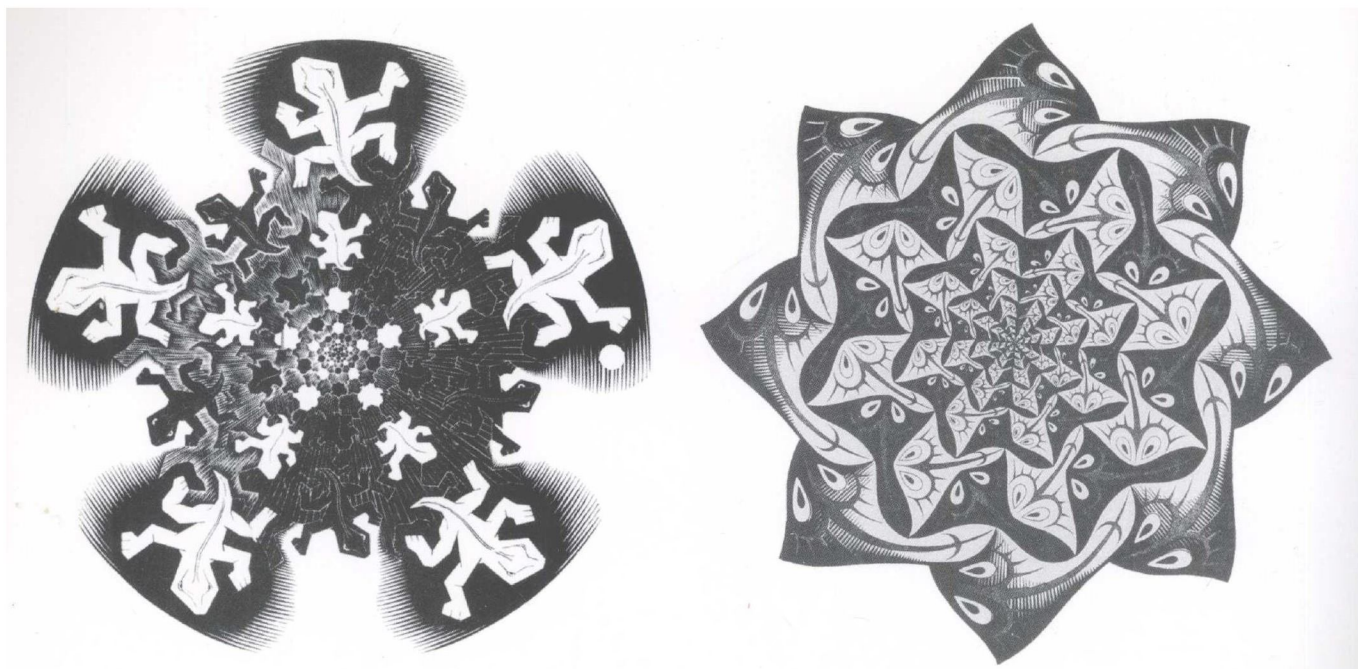
3. 首先发现八重旋转对称的二维准晶 (Phys. Rev. Lett., 1987 (59): 1010);

4. 首先发现稳定的十重旋转对称的二维准晶 (J. Mater. Sci. Lett., 1988 (17): 1284);

5. 首先发现一维准晶 (Phys. Rev. Lett., 1988 (61): 1116);

6. 首先发现具有立方对称的三维准晶 (J. Phys.: Condens. Matter, 1990 (2): 9749), 阐明准晶的必要条件是准周期性，而不是所谓的非晶体学旋转对称 (如五重、八重、十重、十二重旋转对称)。

在多所大学任兼职教授、博士生导师，至今培养了110位研究生。



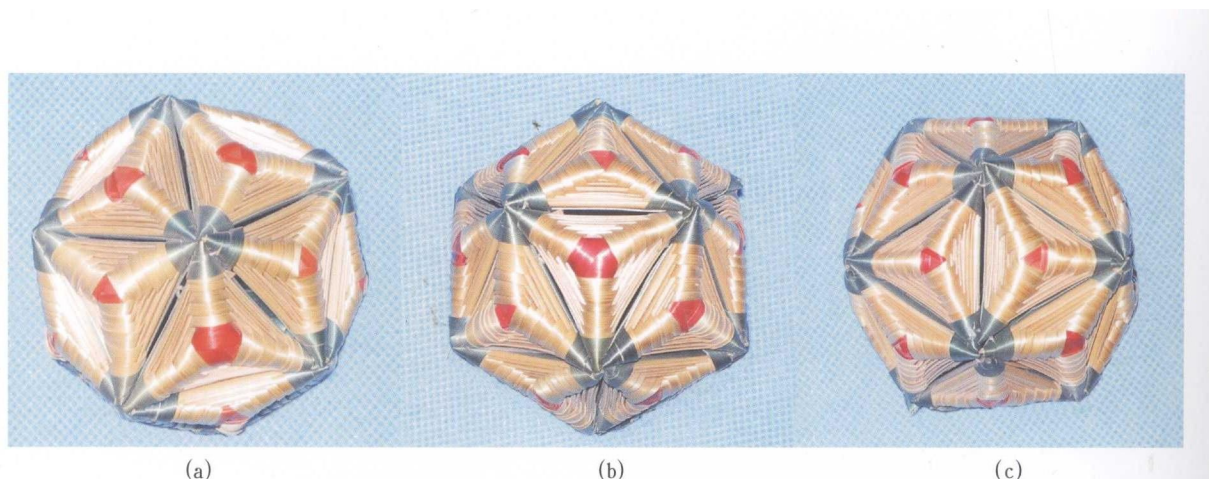
(a)发育 II (1937)

(b)生命之旅I (1958)

彩图1 荷兰画家M.C. Escher的版画(©2004 The M.C.Escher Company-Baarn-Holland. All rights reserved)

Escher 在1926/27年就在他的绘图中引入黑白两色拼块制成双色对称图,比科学家在1939年提出反对称早。差不多同时他还用多种彩色拼块制成彩色对称的图案,比1957年引入彩色对称群要早二十多年。接着,他还进一步将蚂蚁、爬虫、鱼、骑士、天使、鬼怪引进二维平面的规则分割,圆的极限,三维多面体的绘图,个体的生长和变异等等,使一些立体几何、非欧几何、拓扑学问题变得简单易懂(见王庚,埃舍尔作品的数学趣味,科学,2004(56, No.3):58-61)。

周期性晶体中的亿万万个晶胞都是等同的,没有变异,没有生长,因此有人说:晶体是死的,没有生命。Escher也认识到这一点,所以他早在20世纪中叶就先后画了蜥蜴的五重旋转对称图(彩图1(a))和鱼的八重旋转对称图(彩图1(b)),用他们的发育和生命旅程显示准周期性和自相似性。他的这两幅绘图对我们在几十年后发现和理解二十面体(包括五重旋转)准晶和八重旋转准晶很有启发。



(a)

(b)

(c)

彩图2 我国民间手工艺品——稻草编织的二十面体香包

(a)五重轴(蓝色)的体视图;(b)三重轴(红色)的体视图;(c)二重轴(蓝色棱中点)的体视图

前言

经典晶体学家认为,晶体中的原子在空间呈三维周期排列,这就排除了五重旋转对称的可能性。道理很简单,我们可以分别用具有二重旋转对称的平行四边形或矩形、三重对称的正三角形、四重对称的正方形及六重对称的正六边形地砖铺满地面,但用正五边形地砖铺地面就会产生许多空隙,而晶体中是不允许有空隙存在的。因此,五重旋转对称在晶体学中常称为“不允许的”或“非晶体学的”对称。当 D. Shechtman 等在 1984 年底宣布,他们在急冷凝固的 Al-Mn 合金中发现具有五重旋转对称但并无平移周期性的合金相后,就在晶体学及其有关的学术界(固体物理、固体化学、材料科学、矿物学等)产生很大的震动。稍后,这种无平移周期性但有位置序的晶体就称为准周期晶体(Quasiperiodic Crystal),简称准晶(Quasicrystal)。英国学术刊物《Nature》对此报道时所用的标题是《面对五重旋转对称吗?》,另一家科学周刊用的标题是《晶体学定律的瓦解!》。经典晶体学家在相当一段时间里一直对准晶持保留态度,其代表人物 L. Pauling(晶体学权威,因在化学键和分子结构方面的突出贡献获 1954 年诺贝尔化学奖)甚至称准晶为 Nonsense!

20 世纪 50 年代初,我在研究高合金钢中的合金相时,就接触过一些由二十面体^①等原子簇构成的四面体密堆结构,如

① 二十面体(Icosahedron)是由 20 个正三角面围成的凸正多面体,有 12 个由 5 个正三角面围成的正五重顶,6 个五重旋转反轴 $\bar{5}$ 通过两两相对的、取向相反的五重顶。此外还有 10 个三重旋转反轴 $\bar{3}$ 通过两两相对的、取向相反的正三角面中心,15 个二重旋转轴通过相对的一对棱的中点,15 个镜面 m 与二重轴正交,二十面体点对称群是 $\frac{2}{m}\bar{3}\bar{5}$,总共有 120 个等效位置(见附录 I, II 及彩图 2)。二十面体也可看作是 20 个四面体共一个顶点、相邻的两个四面体共一个三角面的紧密堆积。在四面体密堆合金相或 Frank-Kasper 相中,较小的原子居于二十面体中心,较大的原子在 12 个五重顶处。

η - M_6C 相和 Laves 相、 σ 相、 β -Mn 相等(见附录 V 中的论文[1-4])。当时并没有、也不可能想到这些合金相中的五角反棱柱(加上上、下两个顶就是二十面体)、六角反棱柱、四角反棱柱等结构单元就是几十年后发现的二十面体对称、十二重对称和八重对称准晶的基石。“文化大革命”中虽然不能正常进行科研工作,但我仍一直关注四面体密堆合金相的合金学和晶体学的研究。当中国科学院金属研究所在 1982 年引进一台高分辨电子显微镜后,我就在 1983 年开始与叶恒强、李斗星同志和研究生王大能研究高温合金中的 σ 相、Laves 相及有关的四面体密堆合金相,除了发现一批新的合金相,还在 1984 年夏发现五重对称的电子衍射图,并认为这是由这些合金相中的二十面体原子簇构成的纳米畴给出的(第 1 章)。

为了证明上述观点,除了计算单个二十面体原子簇的电子衍射图外,还开展了一些合金的急冷凝固实验,以期得到单个的二十面体原子簇。张泽等在 1984 年底先后在 $(Ti_{0.9}V_{0.1})_2Ni$ 及 Ti_2Ni 合金中观察到五重旋转对称电子衍射图,接着(1985 年初)在这些合金中发现二十面体准晶,并测定了 Ti_2Ni 二十面体准晶与 η - Ti_2Ni 立方相(与 η - M_6C 的结构基本相同)的取向关系。稍后,董闯等在 Ti_2Fe 合金中发现二十面体准晶与 α -(Ti-Fe-Si)相共存,后者中有著名的 Mackay 双二十面体球壳原子簇。我们关于 Ti-Ni 和 Ti-Fe 二十面体准晶的报道,虽然比 Shechtman 等发表的 Al-Mn 二十面体准晶论文晚一些,但却是独立的发现。在这之后,我们还开展了 Al-Cr, Al-Li-Cu(晶体相 Al_5Li_3Cu 中有 Samson-Pauling-Bergman 二十面体球壳原子簇), Al-Mn-Pd, Mn-Ni-Si(晶体相 Mn_3Ni_2Si 是 Laves 相), Ga-Mn, Zn-Mg-Y 等合金中二十面体准晶的合金学研究(第 2 章)。

虽然,五重旋转对称这一“反常”现象引起学术界很大的震动,但是,准周期性(Quasiperiodicity)才是准晶的本质。R. Penrose 曾给出具有五重旋转对称的二维准周期拼图, A. L. Mackay 在准晶发现前就曾得出这种拼图的五重对称光学变换图。放弃晶体必须要有周期平移这一传统的、但从未被证明过的概念,接受准周期性,五重旋转对称就成为可能。在一个准周期方向,有 1 和黄金数 $\tau = (1 + \sqrt{5}) / 2 = 1.61803 \cdots$ ($\cos 72^\circ = (\tau - 1) / 2$) 两个重复单元。二十面体准晶在三维空间中的 3 个准周期方向有 6 个重复单元,它的一些晶体学问题可以上升到六维超空间作为周期性晶体处理后,再投影到三维超平面得出实空间的准周期结构。二十面体准晶一问世,它的高维空间处理即得到广泛应用。杨奇斌等将此推广到与二十面体准晶共存并有相同二十面体原子簇的一些结构类

似准晶的晶体相(Crystalline approximant),并由此推导出二十面体准晶的结构模型。近来还系统地分析了二十面体准晶及结构类似准晶的晶体相中常见的Mackay和Samson-Pauling-Bergman两种二十面体球壳结构(第3章)。

1985—1986年间,美国L. Bendersky,印度K. Chattopadhyay等,我国冯国光等分别在急冷凝固的Al-Mn及Al-Fe合金中发现亚稳的十重旋转二维准晶,其中二维准周期原子层在与它正交的十重旋转轴方向呈周期排列。我们系统地研究了Al-Cr, Al-Mn, Al-Fe, Al-Co, Al-Ni, Al-Ru, Al-Rh, Al-Pd, Al-Os, Al-Ir, Al-Pt, Ga-Mn及一些三元、四元合金中的十重准晶和结构类似准晶的晶体相。此外,在1988年何伦雄、张泽、吴玉琨等首次在缓冷的Al-Co-Cu合金中发现了稳定的十重旋转对称二维准晶,并发现长成毫米尺寸的十棱柱准晶,为以后的X射线晶体结构测定和物性测定创造了条件(第4章)。

李兴中等根据Al-Mn合金中类似准晶的晶体相中的五角面原子层结构,构筑出十重准晶的十重对称准周期原子层的模型及其彩色群。W. Steurer和郭可信开展了对单颗粒Al-Co-Cu十重准晶的高维空间X射线结构分析,首先给出实验测定的十重准晶的结构。李慧林、张泽等分析十重准晶的高分辨电子显微像中重复单元的错排,从而测定其中相子(Phason)缺陷的数目及位置。张洪等在十重准晶层中的两个准周期方向引入相子,得出一系列晶格常量按 τ 倍递增的正交晶体相。此外,还用X射线单晶衍射测定了十重准晶的多种相关合金相的晶体结构(第5章)。

晶体必须具有周期性这一传统概念一旦被冲破,五重旋转对称之外的“不允许对称”也相继被提出,如八重旋转对称。在1987—1988年间,王宁、陈焕等和曹巍等先后在急冷的Cr-Ni-Si及Mn-Si合金中首次发现具有八重旋转对称的二维准晶。这些准晶都与一种具有 β -Mn结构的类似准晶的晶体相共存。王曾楣等对八重准晶的高维空间晶体学特征进行了全面分析。麦振洪等在八重准晶格中引入相子得出 β -Mn结构,与王宁等的实验结果相符。姜节超等研究了八重准晶中的畴结构和相子的类型、数目和分布(第6章)。

五角四面体密堆相中有大量五角反棱柱单元(十重旋转对称),在这些合金中发现五重旋转对称后,叶恒强等在1985年就预言在有六角四面体密堆相(如sigma相)的合金中有可能发现由六角反棱柱给出的十二重旋转对称。同年,T. Ishimasa等首先在用喷雾法制出的Cr-Ni粉晶的表面发现十二重旋转对称二维准晶与六角四面体密堆的sigma相共存。在这之后,陈焕、李斗星等又在急冷的Cr-Ni-Si和V-Ni-Si合金中发现十二重准晶与sigma相共存。高分辨电子显微像显示这种准晶的准周期层是由正三角形(3)和正方形(4)拼成的,如果

它们在平面上按 43433 顺序围绕所有格点,就构成 sigma 相的正方形网格。据此,郭可信等提出一个十二重准晶的随机生长模型(第 7 章)。

上面讲到的二维八重、十重和十二重准晶,都是二维准周期层在其法线方向的一维周期堆垛。那么,是否存在二维周期层在其法线方向的一维准周期堆垛呢?张泽等曾在三维二十面体准晶中观察到局部的一维周期序。何伦雄、李兴中、张泽等首次在 Al-Co-Cu 和 Al-Ni-Si 合金中发现一维准晶,其中的二维周期原子层在其法线方向呈准周期排列。张洪等在二维十重准晶中引入相子,得到一系列一维准晶(第 8 章)。

以上所讲的准晶都具有传统晶体所不允许的“非晶体学”的旋转对称。在前面已经指出,准晶的本质是准周期性或准周期位置序,而不是这些“非晶体学”旋转对称。因此,准晶也可以有传统晶体所具有的旋转对称,如立方对称。这在理论上已由 T.Janssen 阐明,而在实验上首先由冯永昌等所证实。

在 Al-Mn 二十面体准晶发现后的三四年中,准晶的基本类型都已陆续发现,准晶也逐渐为人们所接受,其中的原子分布虽然没有周期性,却有严格的位置序,因此能给出明锐的衍射斑点。由于急冷凝固得到的准晶的颗粒度属微米量级,因此上述各类准晶都是首先在透射电子显微镜中用微区电子衍射发现的。本书中所讲的实验内容,也大都与电子衍射和电子显微像有关。准晶的发现扩大了晶体的范畴,既包括具有周期位置序的传统晶体(已发现上百万种),也包括具有准周期位置序的准晶体(已发现几百种合金准晶)。

就在本书定稿之际,传来了在树枝状有机超分子自组装成的液晶中发现了准晶的信息。这种液晶准晶(Liquid Quasicrystal)不但具有十二重旋转对称准晶的准周期特征,而且其中的结构单元也是正三角形和正方形,一如 V-Ni-Si 合金中的二维十二重准晶,所不同的是液晶准晶中的一个含有 10^3 — 10^4 个原子的胶束(液晶球)相当于合金准晶中的一个原子(见 7.4 节)。这一发现将准晶出现范围从合金扩展到有机分子,从固态延伸到液晶,意义深远。

上述是我们过去 20 年的准晶研究历程,也是本书的梗概,因此书名选用《准晶研究》。由于我们的研究工作的局限性,本书侧重准晶的合金学与晶体学,并且主要是我们自己的研究成果,难免有所偏废。好在国内在准晶的理论方面已经有刘有延、傅秀军合著的《准晶体》(上海科技教育出版社,1999)、范天佑著的《准晶数学弹性理论及应用》(北京理工大学出版社,1999)和王仁卉、胡承正、桂嘉年合著的《准晶物理学》(科学出版社,2004),在衍射方面有周公度、郭可信著的《晶体和准晶体的衍射》(北京大学出版社,1999),在材料学方面有董闯著的《准晶材料》(国防工业出版社,1998),可以弥补本书的不足。此外,还

在附录 I 中重印了我此前写的“二十面体壳层结构”一文(适当增减),在附录 II 中讨论 3 到 13 个“二十面体的连接”,在附录 III 中注明一些与准晶有关的“晶体学名词、符号及简写”,并在附录 IV 中列举了有关的“准晶专著、会议文集和专题综述”。在本书写作方面,多用具体图像,少用数学公式,目的是引导读者理解什么是准周期性,为什么五重、八重、十重、十二重等旋转对称能出现,为什么准晶会在铝、镓、铟合金,镁合金,铜、银合金,锌、镉合金,钛、锆、钎合金以及不锈钢耐热钢中普遍存在等重要问题。

本书的内容是集体研究的成果,只不过是由我执笔而已。我在过去几十年中培养了 100 多位研究生,约三分之一从事准晶研究(见附录 VI),发表了 161 篇有关准晶研究的论文(见附录 V),没有他们的聪明才智和全心投入,这本书是无法完成的。有幸与这些生气勃勃的青年学子共同切磋、互相学习,是我后半生最感快慰的事。在 1947—1956 年间,我曾先后在欧洲 3 所大学从事科学研究,在那里导师的作用只是定方向和把成果关这一头一尾两件事。怎样制定研究方案,解决实验困难,如何处理数据,进行理论分析,最后撰写论文都是研究生自己的事。我是这么过来的,也认为只有这样才能培养出善于独立思考和具有创新能力的科学家;只有让青年人脱离我自己的业务局限,充分发挥他们的聪明才智,才能达到青出于蓝而胜于蓝的目的。我的众多研究生中,张泽和王大能、王宁和陈焕因在准晶研究方面的优异表现,先后获第一、第二届吴健雄物理奖,就充分证明了这一点。从他们的成长过程中我还认识到,对于科研创新,勤奋、执着和才华三者缺一不可,但是前两者更重要。

感谢与我共同开始四面体密堆合金相研究从而发现准晶的叶恒强、李斗星、张泽、王大能同志,我们共同在 1987 年获得了国家自然科学一等奖。还要感谢后来陆续参加准晶研究的 40 多位研究生(见附录 VI),这本书是我们这个集体 20 年辛勤工作的结晶。感谢王仁卉、吴玉琨、杨奇斌、关若男、邹本三、王元明、黑祖昆、王蓉、冯国光、褚一鸣、李方华、张殿琳、麦振洪、刘有延、马哲生、施倪承、周湖云、邹晓冬、K. Chattopadhyay, S. Hovmöller, A. Mackay, S. Ranganathan, W. Steurer, A.-P. Tsai(蔡安邦), K. Urban 教授等的长期合作和有益讨论。

感谢中国科学院前任院长卢嘉锡院士和周光召院士、感谢钱临照、黄昆、柯俊、冯端、章综院士等十几年来对我们的准晶研究的关怀和大力支持。感谢中国科学院和国家自然科学基金委员会的资助,使我们一直有良好的实验条件和充足的经费。

我们的准晶研究历时 20 年,先后在中国科学院金属研究所的原子像实验

室和中国科学院北京科学仪器中心和物理研究所的北京电子显微镜实验室进行。研究生除了来自这些研究单位,还主要来自大连理工大学、北京科技大学等高校(附录 VI)。对这些学术机构的领导的长年和热心支持,深致谢忱。

感谢浙江大学材料化工学院李宗全、张孝彬教授在本书写作过程中的有益讨论和中肯建议,使得对准晶晶体学的一些阐述更加清晰、准确、易懂。感谢王仁卉、吴玉琨、李日升教授协助校稿。当然,错误之处仍在所难免,这应由我完全负责。

感谢肖烈菊、邓德伟、阮娟芳同志在书稿绘图和文字录入方面给予的协助。

郭可信

2004 年 9 月

编著说明

1. 人名：在正文中，中文人名用全称；外文人名第一次出现时用全名或缩写名字和姓氏，以后只用姓氏。

2. 参考文献：列在每章后，按阿拉伯数字顺序排列，在正文中引用时用上标注明。

期刊：作者. 题(篇)名. 刊名, 出版年(卷号, 期号) : 页次

书籍(文集)：作者(编者). 书名. 出版地：出版者, 版本, 出版年：页次

文集集中的论文：作者. 题(篇)名. In(见)：编者. 文集名, 出版地：出版者, 出版年：页次

3. 本书作者和合作者、学生(姓名见附录 VI)发表的有关准晶和相关晶体相的英文论文目录列于附录 V 中, 按出版年顺序排列, 阿拉伯数字置于括号[]内, 在正文中引用时带括号用上标注明。

4. 图、表、公式的数字符号中, 第一个数字是章的序号, 第二个数字是在此章中出现的序号, 两者用短线连接。未注明出处的图均是专为本书绘制的。

5. 长度单位用 m, cm, mm, μm , nm 等。

6. 晶体学名词及符号采用国际晶体学联合会主办的《晶体学报》(Acta Crystallographica)的写法, 译名参考《物理学名词》(科学出版社, 1996), 并在这些名词第一次出现时伴有英文名词, 第一个字的字头用大写。符号及简写见附录 III。

目 录

前言

第 1 章 五重旋转对称	1
1.1 正五边形	1
1.1.1 五角星形	2
1.1.2 正五边形的连接	3
1.2 五重对称多面体	5
1.2.1 正多面体	5
1.2.2 半正多面体	9
1.2.3 Kasper 三角面多面体	11
1.3 四面体密堆合金相	13
1.3.1 二十面体的连接	13
1.3.2 Laves 相	16
1.3.3 μ 相	18
1.3.4 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$	19
1.3.5 Frank-Kasper 五边形网	20
1.4 五重对称的电子显微学	21
1.4.1 高分辨电子显微像	21
1.4.2 纳米畴的五重对称电子衍射图	25
1.5 本章结束语	28
参考文献	29
第 2 章 三维二十面体准晶(合金)	31
2.1 钛、锆及钎合金准晶	32
2.1.1 Ti_2Ni 二十面体准晶	32
2.1.2 Ti_2Fe 二十面体准晶	39
2.1.3 $Ti-TM(Si)$ 及 $Ti-Zr-TM(Si)$ 二十面体准晶	43
2.1.4 $Zr-TM$ 及 $Hf-TM$ 二十面体准晶	43
2.2 铝、镓及铟合金准晶	44
2.2.1 $Al-Mn$ 二十面体准晶	44
2.2.2 $Al-Cr(Si)$ 二十面体准晶	46
2.2.3 $Al-TM$ 二十面体准晶	48
2.2.4 $Ga-Mn$ 合金准晶	50

2.2.5 铜合金准晶	51
2.3 镁、锌及镉合金准晶	51
2.4 稳定的二十面体准晶	52
2.4.1 二十面体稳定准晶的分类	52
2.4.2 $\text{Al}_6\text{Li}_3\text{Cu}$ 二十面体准晶	53
2.4.3 $\text{Al}_{63}\text{Fe}_{12}\text{Cu}_{25}$ 二十面体准晶	54
2.4.4 Al-Mn-Pd 二十面体准晶	54
2.4.5 电子化合物	55
2.5 准晶的制备	56
2.5.1 非熔炼制备工艺	56
2.5.2 离子注入	58
2.5.3 固溶体中析出(工业合金中的准晶)	59
2.6 五重孪晶	60
2.6.1 准晶还是五重孪晶	60
2.6.2 类似准晶的晶体相的五重孪晶	61
2.6.3 准晶的多重孪晶	63
2.7 本章结束语	63
参考文献	65
第 3 章 三维二十面体准晶(结构)	70
3.1 五重旋转对称与准周期性	70
3.1.1 Fibonacci 数列	70
3.1.2 二维空间投影	73
3.1.3 Penrose 拼图	76
3.1.4 Gummelt 覆盖	79
3.2 三维二十面体准晶格	80
3.2.1 三维六指数	80
3.2.2 简单及面心二十面体准晶格	81
3.3 二十面体结构与晶体相	84
3.3.1 二十面体对称壳层	85
3.3.2 二十面体等级结构	86
3.3.3 准晶的相关晶体相	90
3.4 二十面体准晶与菱面多面体	92
3.4.1 菱面十二面体	92
3.4.2 菱面三十面体	93
3.5 本章结束语	95
参考文献	96
第 4 章 二维十重对称准晶	101
4.1 十重旋转对称	102
4.1.1 准周期层	102
4.1.2 准周期层的周期堆垛	107

4.2 二维十重准晶与三维二十面体准晶	110
4.2.1 结构关系	110
4.2.2 IQC→DQC 相变	111
4.3 十重准晶的相关晶体相	114
4.3.1 相关晶体相	114
4.3.2 单斜 $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ 及相关结构	115
4.3.3 正交 Al-TM 晶体相	118
4.3.4 六角晶体相	122
4.4 二维十重准晶格	130
4.4.1 正交 Ga-TM 晶体相	130
4.4.2 Gummelt HBS 模型	133
4.5 本章结束语	135
参考文献	135
第 5 章 十重准晶的精细结构	139
5.1 五重旋转对称的二维准晶	139
5.1.1 选区电子衍射(SAED)	140
5.1.2 会聚束电子衍射(CBED)	141
5.1.3 高分辨电子显微像(HREM 像)	141
5.1.4 大角度环束暗场像(HAADF 像)	144
5.2 五重对称原子簇	144
5.2.1 片状五重原子簇	145
5.2.2 五重对称的破缺	147
5.2.3 轮状五重对称原子簇	148
5.3 十重准晶中的缺陷	151
5.3.1 相子缺陷	152
5.3.2 Al-Co-Cu-Si 十重准晶中的相子缺陷	154
5.3.3 准晶中的位错	154
5.4 十重准晶的相变	156
5.4.1 相子产生的衍射峰位移	156
5.4.2 DQC→相关晶体相	158
5.5 本章结束语	161
参考文献	162
第 6 章 二维八重对称准晶	167
6.1 八重旋转对称	167
6.1.1 Octonacci 数列	167
6.1.2 八重对称准周期拼图	170
6.2 八重旋转对称准晶	173
6.2.1 八重准晶	173
6.2.2 45° 孪晶	178
6.3 相子缺陷	180

6.3.1	Ammann 线	182
6.3.2	$\text{Mn}_{80}\text{Si}_{15}\text{Al}_5$ 八重准晶中的相子缺陷	184
6.3.3	相子缺陷与衍射斑点位移	184
6.3.4	有序畴与公度错	186
6.4	相关晶体相	188
6.4.1	$\beta\text{-Mn}$ 结构	189
6.4.2	Mn_3Si 结构	193
6.4.3	$\text{Mn}_{12}\text{Si}_5$ 亚稳相	197
6.5	本章结束语	198
	参考文献	198
第 7 章	二维十二重对称准晶	202
7.1	十二重旋转对称	202
7.1.1	Dodecanacci 数列	203
7.1.2	十二重对称准周期拼图	204
7.2	十二重旋转对称准晶(合金)	207
7.2.1	V_3Ni_2 十二重准晶	208
7.2.2	σ 相	210
7.2.3	六角 Frank-Kasper 相	212
7.3	十二重旋转对称准晶(钽的碲化物)	218
7.3.1	$\text{Ta}_{1.6}\text{Te}$ 十二重准晶	219
7.3.2	相关晶体相	220
7.4	十二重旋转对称准晶(有机超分子液晶)	223
7.4.1	液晶准晶(LQC)	224
7.4.2	结构模型	226
7.5	十二重准晶的生长模型	227
7.6	本章结束语	229
	参考文献	230
第 8 章	一维准晶与长周期结构	234
8.1	一维准晶	234
8.1.1	结构特征	234
8.1.2	二维十重准晶 $\rightarrow$ 一维准晶	239
8.1.3	一维准晶的五重孪晶	242
8.2	空位有序一维长周期结构	243
8.2.1	τ_n 相	243
8.2.2	B2 结构与准晶	246
8.3	本章结束语	248
	参考文献	248
附录 I	二十面体壳层结构	251
I.1	二十面体对称	251
I.2	圆顶建筑	255

I .3 球状病毒	257
I .4 多面体分子	260
I .5 C_{60} :Buckminsterfullerene	263
I .6 固体 C_{60} :碳的一种新结构	265
参考文献	268
附录 II 二十面体的连接	270
II .1 3 个二十面体(I3)的连接	270
II .2 4 个二十面体(I4)的连接	274
II .3 5 个二十面体(I5)的连接	280
II .4 6 个二十面体(I6)的连接	281
II .5 7 个二十面体(I7)的连接	283
II .6 13 个二十面体(I13)的连接	285
参考文献	285
附录 III 晶体学名词、符号及简写	288
附录 IV 准晶专著、会议文集和专题综述	291
IV .1 准晶专著	291
IV .2 国际准晶会议文集(Proceedings of International Conference of Quasicrystals, ICQ)	291
IV .3 准晶论文集	292
IV .4 专题综述论文	294
附录 V 郭可信和合作者、学生(见附录 VI)的准晶论文目录	296
附录 VI 从事过准晶及相关晶体相研究的研究生	307