

应用晶体 物理学

〔日〕小川智哉 著

科学出版社

344736

073:
9284*

应用晶体物理学

[日] 小川智哉 著

崔承甲 译

郑哲洙 崔凤柱 校

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书系统地阐述晶体的物理性质及其应用，全书共分六章：第一章晶体的特征和表示法；第二章晶体的物理性质；第三章晶体和极性二阶张量；第四章晶体和极性三阶张量；第五章晶体和极性四阶张量；第六章晶体和轴性张量。每章均有提要、习题和参考文献，书末附有晶体常数表 19 种。

本书可供晶体学、物理学、化学、矿物学、金属学等有关学科的科技人员和大专院校师生参阅，尤其可作为学习晶体学的入门书。

小川智哉
结晶物理学
裳华房 1976

应用晶体物理学

[日] 小川智哉 著

崔承甲 译

郑哲殊 崔凤柱 校

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年4月第一版 开本：787×1092 1/32

1985年4月第一次印刷 印张：9

印数：0001—5,700 字数：202,000

统一书号：13031·2858

750书号：1071·13—3

定价：2.15 元

译者前言

晶体学已是一门较成熟的学科。晶体学是建立在 Steno 的面间角守恒定律和 Haüy 的单胞概念上，经过 Miller 等人的许多工作，到 19 世纪末基本打下了晶体学的基础。20 世纪初，Laue 的 X 射线衍射实验，不但验证了 X 射线的波动性，也确认了晶体是由原子有规则的排列而形成的。

1880 年 Curie 兄弟发现了晶体的压电现象，1910 年 Kelvin, Voigt 等建立了它的理论体系。1920 年前后，Langevin、Cady 等人研制出石英振荡器，从此开始了单晶材料在工业上的应用。压电晶体理论对研制新的压电器件，迄今仍起着重要的指导作用。此外，在半导体工业中也大量使用单晶材料，半导体工业就是从生产矿石检波器开始发展起来的。为了研制出更好的检波器和解释整流现象，Schottky, Wilson, Mott, Shockley 等人做了大量的研究工作，由此才创立了今天的半导体理论，使现代半导体工业得以迅速发展。

现代科学技术的发展，要求研制出更精密和更复杂的仪器及生产设备，而单晶器件的好坏就决定了仪器和设备的性能。因此，单晶工业在现代科学技术中占有非常重要的地位，它的产值与日俱增。下表列出了美国、西欧、日本最近几年来半导体和水晶的产值。由这些产值不难看出，不久将来单晶工业的产值有可能超过钢铁工业。

本书是晶体学方面一本较好的人门书。全书主要以晶体在现代科学技术中的直接应用为目标，系统地论述晶体物理学的基本原理和方法，并且精辟地阐述了晶体的各种特性，可

一些工业国的半导体和水晶的产值

单位, 100 万美元

		1980年	1981年	1982年(预算)
半 导 体	美 国	6,633.7	6,902.8	8,233.8
	西 欧	2,650.6	2,404.5	2,654.7
	日 本	4,391.2	5,316.9	6,324.7
水 晶	美 国	110.1	114.5	118.5
	西 欧	109.3	109.5	119.2
	日 本	113.6	136.4	154.6

作为我国理工院校有关专业师生及科技工作者的参考书。

在本书的翻译过程中,曾得到吉林大学余瑞璜教授、798厂科研所吕景楼、1129所孟秀林、延边大学物理系黄亨吉同志以及中国科学院长春光机所李元燮同志等大力支持和帮助,谨此致谢。限于我们的水平,缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

译 者

1983 年 8 月

写在中译本出版之际

崔承甲先生将我的《应用晶体物理学》一书译成中文，使其与中国读者见面，对此我感到非常荣幸。

我们一向十分崇敬中国的古典作品，并把它们看作是精神文明的重要源泉，其中有《论语》、《孟子》等圣人的教诲；有《十八史略》、《三国志》等对无数富于机智而充满波折的、坎坷不平的人生的描述。此外，《西游记》、《水浒传》等长期畅销的小说，对我们日本人来说也是不可缺少的精神食粮。

晶体学是一门成熟的学科，在现代工业，特别是与电子学有关的工业中，晶体材料更是不可缺少的。这一点由如下事实不难看出。从我们身边的石英手表、晶体管收音机、直至支撑着当代所谓信息社会的大型电子计算机，都有单晶制成的器件活跃在其心脏部分。

在日本，迄今仍然经常使用“温故知新”这一成语。晶体学在电子技术中的作用，无疑也可以说是“温故而知新，可以为师矣”吧。并且，若本书能为“学而不思则罔，思而不学则殆”助一臂之力，则幸运矣！

最后，本书的译者崔承甲先生，于1982年7月来到日本学习院大学我的研究室，进行关于利用光散射法评价晶体特性的研究工作，这也无疑是“有朋自远方来，不亦乐乎！”。中国和日本是一衣带水的邻邦，有着两千年文化交流的历史，现在又在科学和技术方面建立起了联系。作为生活在二十世纪的一个日本人，我对这一点感到非常高兴。

小川智哉

1982年12月

前 言

我们的周围存在有许多用单晶制成的工业产品，如电唱机的拾音头、晶体管收音机、电子计算器和石英钟等。以电子计算机为代表的各种电子仪器是现代信息化社会的支柱。但若没有制成优质单晶硅*，这一切是无法实现的。如果进一步考虑到单晶涡轮叶片**等产品，就会发现单晶作为工业材料是个非常重要的原材料。

本书是一本讲述经典晶体物理学及其应用的入门书。在这里，我们不想包罗万象，而是力求对一些基本现象进行通俗易懂的详细解释。正因为这样，本书所涉及的晶体种类不多。为弥补这一缺陷，每章都附有习题，并在书末附有常数表。对本书中未提到的晶体，请读者自行研究解决，但著者相信，本书将会起到入门的响导作用。

本书是以 1974 年在日本学习院大学理学部和北海道大学工学部讲课的讲稿为基础，并考虑到大学三、四年级学生所能接受的程度而改写成的。因此，著者认为在大学学习专业课的学生，及那些没有学过晶体学而在实际工作岗位上从事有关晶体技术方面工作的人员，也能很容易地理解本书内容（下略）。

小川智哉

1976 年 10 月

* 大贯正实，应用物理学会誌，45(1976),11,刊头语。

** 汤川夏夫，日本物理学会誌，14(1972),54。

目 录

第一章 晶体的特征和表示法	(1)
§ 1.1 晶体和社会.....	(1)
§ 1.2 晶体结构要素和晶体点阵.....	(3)
1. 2. 1 晶体结构.....	(3)
1. 2. 2 晶体点阵和晶轴.....	(4)
1. 2. 3 晶系.....	(5)
1. 2. 4 Miller 指数.....	(6)
§ 1.3 极射赤面投影和晶体点群.....	(9)
1. 3. 1 极射赤面投影.....	(9)
1. 3. 2 晶体的旋转和极射赤面投影点的移动.....	(15)
1. 3. 3 Laue 斑和极射赤面投影.....	(16)
1. 3. 4 正射投影和心射切面投影.....	(21)
1. 3. 5 对称元素和晶体点群.....	(21)
习题.....	(35)
第二章 晶体的物理性质	(36)
§ 2.1 物质常数(系数)的定义.....	(36)
§ 2.2 张量.....	(41)
2. 2. 1 标量、矢量、张量.....	(41)
2. 2. 2 坐标变换与张量——张量的定义.....	(42)
2. 2. 3 矢量分量的乘积.....	(45)
2. 2. 4 状态方程的矩阵表示.....	(45)
2. 2. 5 二阶对称张量的几何表示及其特征.....	(46)
2. 2. 6 主轴变换.....	(50)
§ 2.3 晶体的对称元素和极性张量分量.....	(51)

2.3.1 三阶极性张量	(53)
习题	(62)
第三章 晶体和二阶极性张量	(64)
§ 3.1 晶体的光学性质	(64)
3.1.1 折射率椭球	(64)
3.1.2 单轴晶体	(68)
3.1.3 双轴晶体	(79)
3.1.4 晶体的光学应用	(88)
3.1.5 锥光偏振图形	(97)
§ 3.2 应力和应变	(107)
3.2.1 应力	(107)
3.2.2 非均匀应力和运动方程	(109)
3.2.3 应变	(111)
习题	(117)
第四章 晶体和三阶极性张量	(119)
§ 4.1 压电现象	(119)
4.1.1 压电现象的基础	(119)
4.1.2 压电共振器	(125)
4.1.3 在导电晶体中应力和应变的响应	(135)
§ 4.2 Pockels 效应	(144)
4.2.1 Pockels 效应	(144)
4.2.2 光调制	(152)
§ 4.3 非线性晶体光学	(158)
4.3.1 非线性光学	(158)
4.3.2 二次谐波的发生	(161)
4.3.3 光整流	(167)
习题	(169)
第五章 晶体和四阶极性张量	(171)
§ 5.1 Hooke 定律和弹性常数	(171)

§ 5.2	晶体中传播的声波	(173)
5.2.1	Christoffel公式	(173)
5.2.2	声波(能量的)传播方向和纯模轴	(176)
§ 5.3	水晶和声波	(179)
5.3.1	X轴、Y轴及Z轴方向作为波阵面法线方向的平面波	(179)
5.3.2	石英振子—振动模式和共振频率	(184)
§ 5.4	晶体的物理状态和声速	(190)
5.4.1	声速、声束和样品外形	(190)
5.4.2	绝热和等温	(193)
5.4.3	压电晶体	(195)
§ 5.5	光弹性	(197)
5.5.1	光弹效应和光弹性常数	(197)
§ 5.6	声波的光衍射	(200)
5.6.1	Raman-Nath散射	(200)
5.6.2	声学 Bragg 反射	(204)
5.6.3	用声波测定光弹性常数	(207)
5.6.4	声光性能指数	(213)
5.6.5	异常 Bragg 反射	(214)
	习题	(219)
第六章	晶体和轴性张量	(222)
§ 6.1	轴性矢量	(222)
§ 6.2	晶体的对称元素和轴性张量分量	(226)
§ 6.3	旋光现象	(230)
6.3.1	旋光性的描述	(230)
6.3.2	α -水晶的旋光性	(234)
6.3.3	光学活性	(235)
6.3.4	磁场所引起的偏振面的旋转	(243)
	习题	(248)
	参考文献及参考书	(249)

附表 1	晶类 $\bar{4}3m$ 型化合物半导体的弹性常数、 压电常数及介电常数.....	(255)
附表 2	电介质晶体的压电常数、弹性常数及介 电常数.....	(256)
附表 3	晶类 $6mm$ 型晶体的弹性常数和介电常 数.....	(258)
附表 4	声电换能材料的一些常数.....	(259)
附表 5	晶体的泡克耳斯系数.....	(260)
附表 6	晶体的 Kerr 系数.....	(262)
附表 7	非线性光学系数.....	(262)
附表 8	KDP 晶体的位相匹配条件.....	(264)
附表 9	ADP 晶体的位相匹配条件.....	(265)
附表 10	LiNbO_3 晶体的位相匹配条件.....	(266)
附表 11	立方晶体的弹性常数和声速.....	(266)
附表 12	属于六角晶系晶体的弹性常数和声速...	(268)
附表 13	属于三角晶系晶体的弹性常数 (1)	(268)
附表 14	属于三角晶系晶体的弹性常数 (2)	(269)
附表 15	弹光系数 p_{nm} (无量纲).....	(269)
附表 16	声光性能指数 (1)	(270)
附表 17	声光性能指数 (2)	(272)
附表 18	KDP, ADP, DKDP 晶体的折射率与温度 的关系.....	(274)
附表 19	方解石的光学常数.....	(276)

第一章 晶体的特征和表示法

众所周知，原子有规则地排列而形成晶体。探索晶体内部的原子状态及以此为目的而编写的书籍甚多。与此相反，着重于晶体所具有的宏观对称性，并论述这种对称性在晶体的物理性质中如何反映出来，这虽已成为经典理论，但当前却还缺乏这一方面合适的有关读物。本书论述有关这种经典晶体学的应用，第一章则是为此目的而写的序论。

§ 1.1 晶体和社会

自从金刚石、水晶之类的各种晶体，以其美丽的外形、夺目的光彩和无比的硬度吸引着人们的注意以来，不知经历了多少岁月！毫无疑问，最初同人类发生联系的晶体是宝石，其次大概就是作为资源的矿石了。人们从矿物分类及其鉴别的需要出发，大约到十八世纪就已经掌握了晶面角守恒定律 (Law of constancy of interfacial angle)* 以及晶体的对称性和晶轴等这些晶体学的重要基础知识**。

这样，作为矿物学的一个学科而发展起来的晶体学，通过 1912 年 Laue 的晶体对 X 射线的衍射实验，才获得了新的生命

* 由于生长条件等的不同，晶体的外观千差万别。但在同一品种的晶体中，对应的晶面角却恒定不变。据记载，此定律是 1669 年由 Nicolaus Steno 发现的。

** 称作现代晶体学鼻祖的 Haüy，根据脱落下来的方解石以具有外形相似的小块劈裂下去的现象，认为晶体是以小的结构单位有规则地排列的集合体。该研究成果发表于 1784 年和 1801 年。关于 Haüy 的晶体结构要素的研究，后来由 Bravais 所完成，并成为现代晶体学的重要基础之一。

力。这一实验不仅证明了“X射线的波动性”，而且还弄清了“晶体就是原子有规则地排列起来的状态”。从此，晶体就在现代固体物理学中起了主导作用。

由于 Shockley, Bardeen, Brattain 等人发明了晶体管，使原来只是作为宝石或学术研究对象的晶体，与工程（工业）发生了不可分离的密切关系。以这一发明作为起点而发展起来的固体电子学，制造出的各种类型的集成电路（IC）和大规模集成电路（LSI）等，导致了计算机、信息处理等领域的飞跃

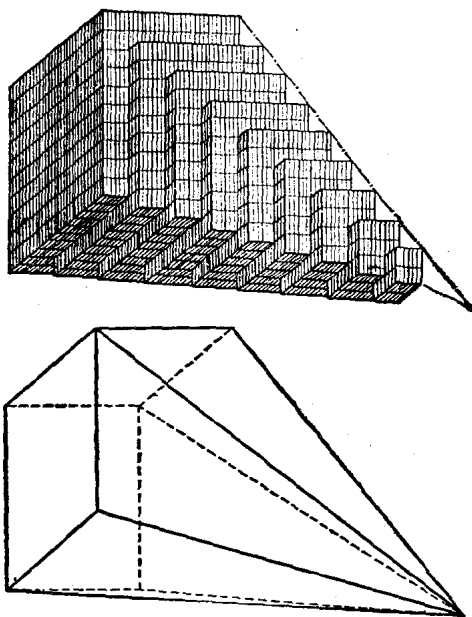


图1.1 晶面的形成 (Haüy).

Haüy 用长方体晶胞的不同堆积方式表示了各种晶面的形成情形。

发展。可以说，这一发展是由于能够生长出高纯度、高度完整的单晶硅而得以实现的，而具有单晶形态的硅在自然界中并不存在。单晶硅是人类创造出来的一个杰作。以硅作为中心

的半导体工业的发展,促进了水晶、光电晶体等各种高性能单晶的生长和研究. 这种时代,要求使居于宝石首位的金刚石,作为世界上最硬的物质被用于制造刀具和研磨材料;以美丽的颜色和光彩而令人喜爱的红宝石,被用来做磨擦及磨损很小的轴承,因而出现了人工生长这些晶体的新兴工业.

此外,在我们周围还存在着作为维持人类文明生活必需品的许多晶体,如砂糖、食盐、化学调味剂和医药等. 本书将系统地叙述由晶体的对称性质所体现出来的各种现象和有关晶体的一些必要的基础知识*. 同时,力求能使读者无论选读哪一章节,都能得到充分理解.

§ 1.2 晶体结构要素和晶体点阵

1.2.1 晶体结构

晶体是由晶胞 (unit cell) 的有规则堆积而构成的(图1.1, 图1.2). 晶胞堆积的方向称为晶轴,通常由不共面的三个矢

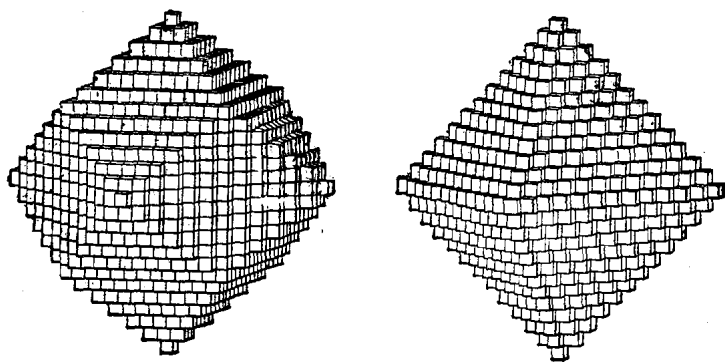


图 1.2 由立方体晶胞构成的正十二面体和正八面体

* 全面论述晶体学的参考书有: 桐山良一:《結構無機化学》I,II,III, 共立全书;《应用晶体学手册》,共立出版.

量 a, b, c 来表示。因此，构成晶体的任意一个晶胞的位置可由下式表示：

$$L = ua + vb + wc, \quad (1.1)$$

式中 u, v, w 为整数。

我们将看到，通过晶胞的有规则的平移，就能构成具有各种外形的晶体，而且晶轴也有各种选法(图 1.3)。下面叙述确定晶轴的方法及晶面的标记法等问题。

1.2.2 晶体点阵和晶轴

若用一个点(如晶胞的中心点)来代表晶胞，则这些点将在三维空间中有规则地排列起来。我们把这些点称为阵点；点的排列称为晶体点阵；含有不在同一直线上的三个以上阵点的平面称为晶格面。任取一阵点，连结它和另外三个阵点的三条直线不在同一平面时，这三条直线成为晶轴(坐标轴)。因此，如图 1.3 和图 1.5 所示，在同一个晶体中可选取多种晶轴。但是，在这些坐标轴中，通常选用对称性最高的一组*(参

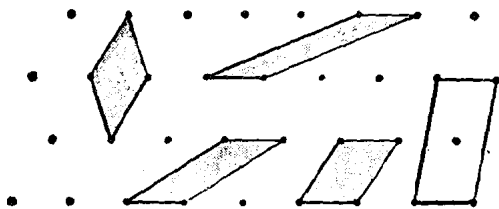


图 1.3 晶轴和晶胞。

以单位长度晶轴为晶棱的平行六面体称为晶胞。晶轴有多种选法，因而晶胞形状也会不同。实质上在晶胞内只含有一个阵点的晶胞称为初基胞(Primitive cell)。初基胞的体积与晶轴选法无关，它是常量(在此图中左边四个晶格为初基胞)。

* 晶轴的选定是完全任意的，只要是方便，怎样选定均可。但若已有前人选定的晶轴，则应采用它。例如，在六角晶系中，如图 1.5(b) 那样选定坐标轴，则晶轴正交而便于处理。在这种情形下，通常采用在正交晶系(orthorhombic system)中进行实验和分析，并最后转换为六角晶系或者写明两者关系的方法。

看 1.3.5 小节)。于是，所有的实际晶体点阵都可用下述七种晶系之一来描述。

1.2.3 晶系

设晶轴 a, b, c 的单位长度为 a, b, c ，它们之间夹角用 α, β, γ 表示(图 1.4)，则有下列七种组合。每一种组合称为一种晶系[将晶轴的对称性写在 [] 内。初学晶体学的读者可参看 1.3.5 小节和图 1.14]。

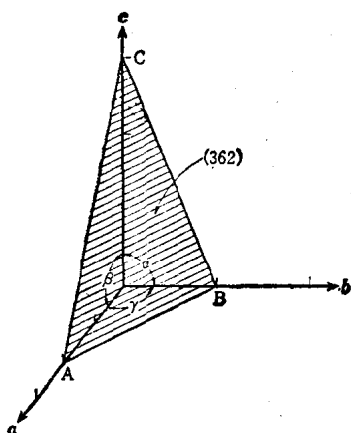


图 1.4 晶轴和晶面。

a, b, c : 晶轴

α : b 轴和 c 轴间的夹角；

β : c 轴和 a 轴间的夹角；

γ : a 轴和 b 轴间的夹角；

晶面 ABC: 相交于 a 轴的 $2a$, b 轴的 b , c 轴的 $3c$ 的晶面, Miller 指数为 (362) 。

1. 立方晶系(isometric system, cubic system)

$$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

(正交的三个轴均为 2 或 $\bar{2}$, 或者 4 或 $\bar{4}$, $\langle 111 \rangle$ 方向为 3 或 $\bar{3}$)

2. 四角晶系 (tetragonal system) $a = b, c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, (c 轴为 4 或 $\bar{4}$)

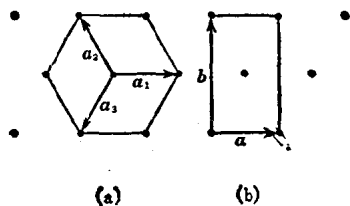


图 1.5 六角晶系的晶轴。

(a) 六角晶轴: 此时, 晶轴有 a_1, a_2, a_3, c 四个, 故 Miller 指数也用四个数字 ($hkil$) 表示, 但由于 $i = -(h + k)$, 也可以写成 (hk, l)。中间加逗号以免与(b)中的六角正交指数混淆。

(b) 六角正交晶轴 (正交晶系): 在此场合, a, b, c 三个轴互为正交。

3. 六角晶系 (hexagonal system) $a = b, c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ (c 轴为 6 或 $\bar{6}$)

4. 三角晶系 (trigonal system) $a = b, c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ (c 轴为 3 或 $\bar{3}$)

属于此晶系的晶体, 也可选用如下晶轴:

$$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma$$

因而, 这一晶系也可称为菱形晶系 (rhombohedral system)。

5. 正交晶系 (orthorhombic system) $a, b, c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (正交的三个轴为 2 或 $\bar{2}$)

6. 单斜晶系 (monoclinic system) $a, b, c; \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta$ (只有 b 轴为 2 或 $\bar{2}$)

7. 三斜晶系 (triclinic system) $a, b, c; \alpha, \beta, \gamma$ (对称元素只有 1 或 $\bar{1}$)

其中尚未指定的轴长和夹角是任意的(即随晶体而变)。

1.2.4 Miller 指数

(1) 晶格面

晶格面或晶格面的延长分别同 a 轴的 n_1a 、 b 轴的 n_2b 、 c 轴的 n_3c 相交时, 选定 N 使 $N/n_1, N/n_2, N/n_3$ (N 为整数) 成为三个最小互质整数*, 并用 (h, k, l) 表示, 这三个最小互质整数