

高等学校教材

# 晶体光学

李家泽 朱宝亮 魏光辉 编著

北京理工大学出版社



# 晶 体 光 学

李家泽 朱宝亮 魏光辉 编著

北京理工大学出版社



## 内 容 简 介

本书是电子工业部统编教材，全书以光的电磁理论为基础，系统地阐述了光波在自然及人工各向异性介质中的传播规律、物理现象及应用原理，较全面地介绍了激光器出现以来，晶体光学领域的新发展和新技术。全书共分六章，内容包括：结晶学基础和晶体物理性质的数学描述方法；光在晶体介质中传播规律与晶体光学器件；电光效应、声光效应及光波在电光、声光晶体中传播规律；强光在光学介质中的传播规律及二阶非线性光学效应。

本书可作为工科高等院校光学系、应用物理系、无线电电子学系有关专业的研究生及本科生教材，也可供从事光电技术的科技工作者参考。

## 晶 体 光 学

李家泽 朱宝亮 魏光辉 编著

\*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

\*

850×1168毫米 32开本 13.875 印张 346 千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷

ISBN 7—81013—252-0/O·44

印数：1—1100册

定价：3.50元



## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室



## 前 言

本教材系按电子工业部制订的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划, 由电子物理与器件教材编审委员会激光与红外编审小组组织征稿、评选、推荐出版的, 责任编辑为赵家驹。

本教材由北京理工大学李家泽担任主编, 上海交通大学谢绳武担任主审。

本课程的参考学时数为 60 学时, 其主要内容为光波在自然各向异性介质和人工各向异性介质中的传播规律及应用原理, 较全面和系统地介绍了激光器出现以来晶体光学领域的新发展和新技术。

全书共分六章, 第一、二章属预备性知识, 分别介绍了结晶学基础和晶体物理性质的数学描述方法; 第三、四、五章是本书的中心内容。第三章着重讨论了光波在自然各向异性介质中传播规律与晶体光学器件。第四章着重讨论电光效应和光波在电光晶体中的传播规律, 电光效应的应用原理等。第五章着重讨论了声光效应和光波在声光晶体中的传播规律、声光效应的原理及声光器件等。第六章简略地介绍了强光在光学介质中的传播规律及二阶非线性光学效应。

本书以光的电磁理论为基础, 为此, 使用本教材的同学需具备电磁学和物理光学的基础知识。

本教材由朱宝亮编写第一章和第三章, 魏光辉编写第二章和第五章, 李家泽编写第四章和第六章, 并由李家泽统编全稿。参



加审阅工作的还有华中理工大学兰信钜。在编写本书时，参阅了一些单位及一些编著者的资料和著作，在参考文献中未能全部一一列出，为此一并表示诚挚感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

**编者**

**1988年12月**



# 目 录

|            |                                         |         |
|------------|-----------------------------------------|---------|
| <b>第一章</b> | <b>点阵、对称性和晶体点群</b>                      |         |
| §1.1       | 晶体的结构 .....                             | ( 1 )   |
| §1.2       | 晶体的对称性 .....                            | ( 10 )  |
| §1.3       | 晶向、晶面指数及晶轴的选择 .....                     | ( 16 )  |
| <b>第二章</b> | <b>晶体性质的数学描述</b>                        |         |
| §2.1       | 二阶张量 .....                              | ( 27 )  |
| §2.2       | 二阶张量的示性曲面及主轴化 .....                     | ( 36 )  |
| §2.3       | 高阶张量及其变换 .....                          | ( 42 )  |
| §2.4       | 表征晶体宏观物理性质的各阶张量与晶体宏观对 称性<br>之间的关系 ..... | ( 46 )  |
| <b>第三章</b> | <b>光在各向异性介质中的传播</b>                     |         |
| §3.1       | 光波的偏振态及其描述 .....                        | ( 57 )  |
| §3.2       | 各向异性介质的介电张量 .....                       | ( 66 )  |
| §3.3       | 单色平面波在晶体中的传播 .....                      | ( 72 )  |
| §3.4       | 图解法 .....                               | ( 88 )  |
| §3.5       | 光在各向异性介质界面上的反射与折射 .....                 | ( 107 ) |
| §3.6       | 晶体的偏光干涉 .....                           | ( 117 ) |
| §3.7       | 偏振棱镜和补偿器 .....                          | ( 133 ) |
| §3.8       | 琼斯算法及应用 .....                           | ( 141 ) |
| §3.9       | 晶体的吸收及色散 .....                          | ( 159 ) |
| <b>第四章</b> | <b>晶体的电光效应及光波在电光晶体中的传播</b>              |         |
| §4.1       | 电光效应的基本原理 .....                         | ( 178 ) |
| §4.2       | 两类典型晶体的线性电光效应 .....                     | ( 195 ) |
| §4.3       | 光波在低频电场作用下的电光晶体中的传播 .....               | ( 208 ) |



|                                   |                          |       |
|-----------------------------------|--------------------------|-------|
| §4.4                              | 光波在微波电场作用下的电光晶体中的传播····· | (231) |
| §4.5                              | 晶体的二次电光效应·····           | (242) |
| §4.6                              | 旋光现象及磁光效应·····           | (251) |
| <b>第五章 晶体的声光效应和光波在声光晶体中的传播</b>    |                          |       |
| §5.1                              | 弹光效应 ·····               | (260) |
| §5.2                              | 声光衍射的布喇格条件 ·····         | (271) |
| §5.3                              | 布喇格声光衍射的分析 ·····         | (277) |
| §5.4                              | 喇曼-奈斯声光衍射·····           | (287) |
| §5.5                              | 表面声波的衍射 ·····            | (291) |
| §5.6                              | 晶体的压电性质及电声换能器原理 ·····    | (297) |
| §5.7                              | 声光器件原理 ·····             | (313) |
| §5.8                              | 其它声光器件 ·····             | (329) |
| <b>第六章 光波在非线性介质中的传播及二阶非线性光学效应</b> |                          |       |
| §6.1                              | 概述 ·····                 | (338) |
| §6.2                              | 非线性极化率的经典理论 ·····        | (343) |
| §6.3                              | 二次非线性极化率 ·····           | (354) |
| §6.4                              | 非线性介质中的电磁波传播方程 ·····     | (373) |
| §6.5                              | 位相匹配 ·····               | (383) |
| §6.6                              | 倍频与混频 ·····              | (411) |
| §6.7                              | 光参量放大与振荡 ·····           | (420) |

## 参考文献



# 第一章 点阵、对称性和晶体点群

在现代光学技术领域，特别是激光技术中大量地使用着各种天然或人工晶体制成的元器件，这些元器件的工作原理涉及到晶体的许多物理特性，尤其是与光学性能有关的特性。由于晶体的性质与晶体的结构有密切的关系，因此了解一些有关晶体结构及对称性的知识，对于学习和掌握本书其它各章中的有关内容是非常必要的。

## §1.1 晶体的结构

晶体是由有规则地排列着的微粒(原子，分子或离子)构成的。微粒的排列是按照一定方式(或规律)不断重复的，这种按一定规律的重复排列叫做晶体结构的周期性。为了描述晶体结构的周期性，我们引入空间点阵的概念。空间点阵由无限个有规律地在三维空间成周期性重复排列的几何点(称为“结点”，在点阵中称为“阵点”)所组成，利用结点在空间点阵中排列的规律性体现晶体结构中的微粒在空间分布的规律，因此它是一种表示晶体内部结构中微粒排列规律性的物理模型。

### 1.1.1 空间点阵与晶体的格子构造

最简单的点阵是一维点阵。一维点阵是由排列在一条直线上的无穷多的等距离的几何点构成的。这些点称为阵点或结点。全部阵点的集合称为直线点阵。因此一维点阵是无限等周期(间距)



的阵点列。借助于平移动作图形可复原，图形复原的最小平移距离 $a$ (两相邻阵点间距)称为直线点阵的周期， $a$ 称为周期矢量，见图1-1。



图1-1 直线点阵

二维点阵又叫做平面点阵，这种点阵的各阵点分布在同一平面内。因此平面点阵可以看成是由一个直线点阵按一定周期 $b$ 进行无限多次平移而成，但此平移矢量 $b$ 与该直线点阵本身内的平移矢量 $a$ 不相平行。按照上两个平移矢量可将平面点阵划分为相互平行排列的平行四边形单位(当然可以有不同的划分方式)。而阵点中各点都位于平行四边形的顶点处。作了如此划分以后的平面点阵称为平面格子或面网，如图1-2示。面网上单位面积内的结点数称为面网密度。

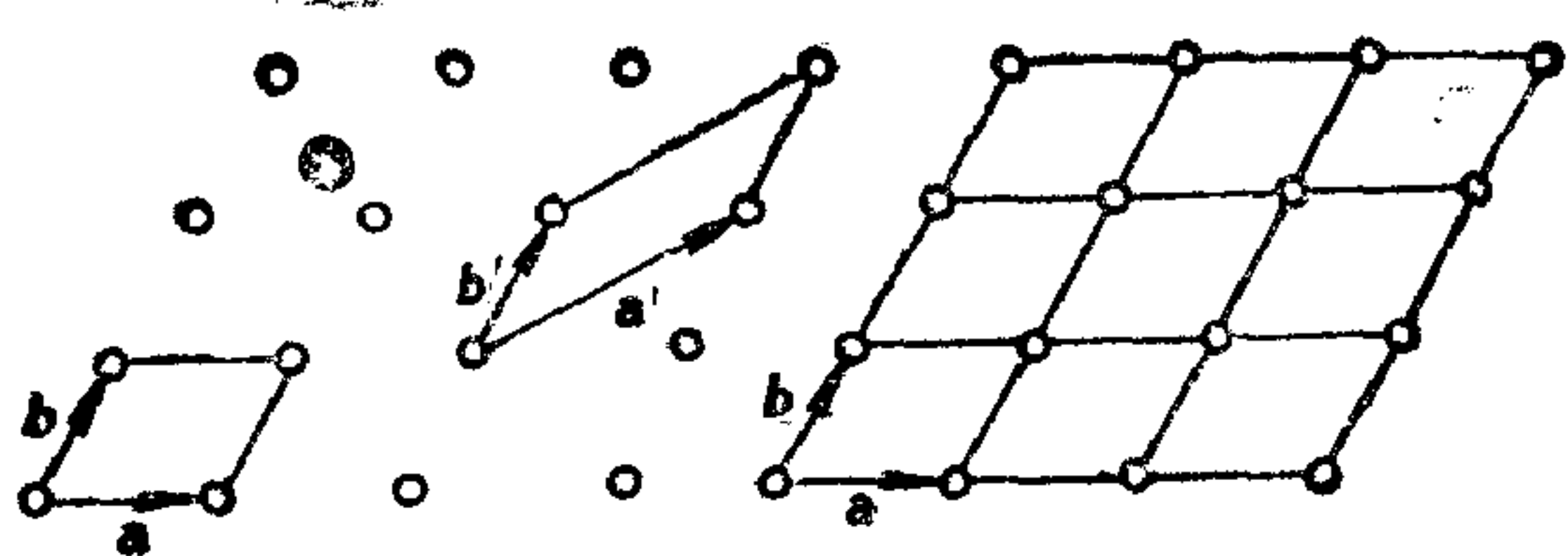


图1-2 平面点阵与平面格子(面网)

各阵点分布在三维空间中的点阵称为空间点阵或三维点阵。空间点阵必可分解为一组平行的平面点阵，亦即空间点阵可以看成是由一个平面点阵按一定周期 $c$ 进行无限多次平移而成，此平移矢量 $c$ 与该平面点阵本身内的任一平移矢量均不平行。在平面格子基础上，再加上不包括在该平面点阵内的第三平移矢量



$c$ ，即任意三个可能的平移矢量 $a$ 、 $b$ 、 $c$ ，可将空间点阵划分为相互平行叠置的平行六面体单位，而且在所有的平行六面体的顶点处都有一个结点。作了如上划分之后的空间点阵即称为空间格子，见图1-3。

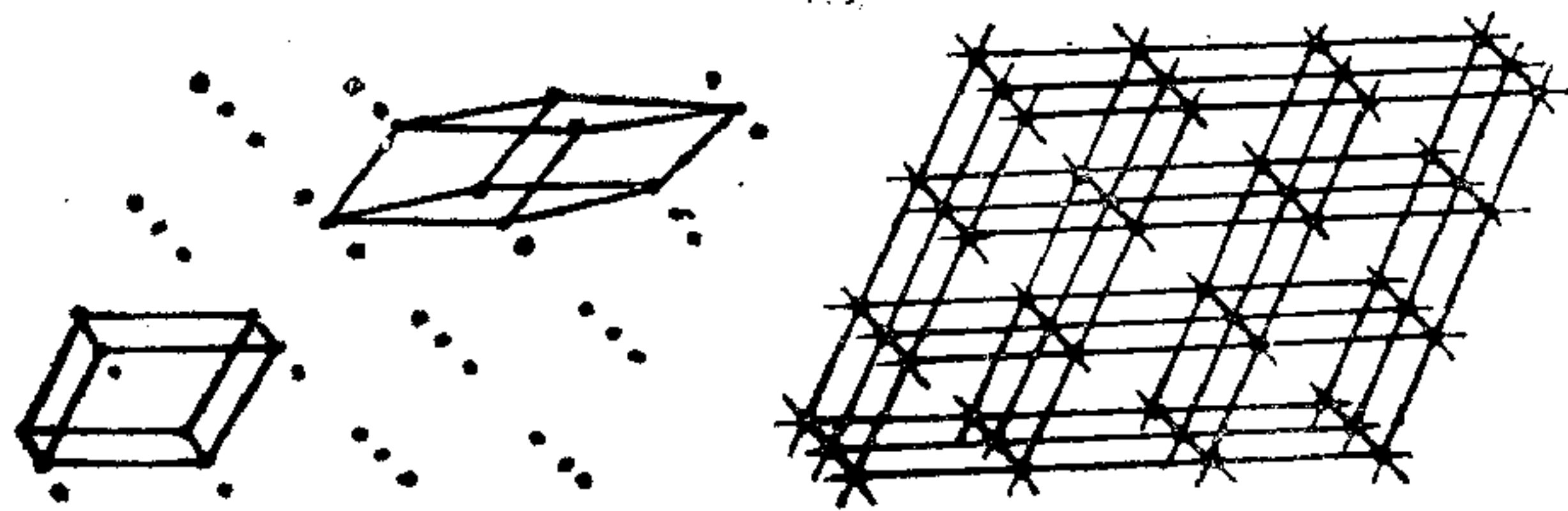


图1-3 空间点阵与空间格子

根据上述点阵的定义，可以导出点阵的如下一些性质：

(1) 联接空间点阵或平面点阵中任意两个阵点即可决定一个“行列”，因此在一个空间或平面点阵中，可以有无限多不同取向的行列，相互平行的行列之结点间距必定相等，而不相平行的行列在一般情况下其结点间距也不相等；

(2) 联接空间点阵中任意三个不在同一直线上的阵点即可决定一个面网。换言之，任意两个相交的行列即可决定一个面网。在一个空间点阵中可有无限多不同取向的面网，相互平行的面网其面网密度必定相等，而不相平行的面网在一般情况下其密度也不相等。此外，任意两个相交的面网之交线必为一公共行列方向；

(3) 空间点阵中任意三个相交且不在同一平面内的行列可决定一个空间格子。由于空间点阵中可以有无限多不同取向的行列，因而相应地就有无限多种划分平行六面体单位的方式。但是，实际上平行六面体单位的划分是要遵循一定原则来进行的；

(4) 点阵经过平移后能够复原，它反映了点阵的周期性。基



本平移矢量 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{c}$ 就是空间点阵的周期矢量。根据点阵能够复原的要求，点阵包含的结点数目必须无限多，且每个结点的周围环境必须相同。

从纯数学意义上讲，一个空间点阵可以有无限多种划分平行六面体单位的方式，相应地就可以有无限多种空间格子的形式。但是在结晶学中引入空间点阵的概念是用来描述晶体结构周期性的，因此我们在划分平行六面体单位的时候，应考虑到晶体实际可能存在的结构形式才有意义。从而，平行六面体单位的选择不是任意的，我们只选择那些能够明确表现出整个空间点阵特性的单位，具体地说，就是应遵守以下三条原则：

(1) 所选择的平行六面体应该能够反映整个空间点阵的对称性，亦即它的对称性应与空间点阵的对称性一致；

(2) 在不违反空间点阵对称性的条件下，平行六面体上棱与棱之间的直角关系应力求最多；

(3) 在符合上两项原则的前提下，所选的平行六面体的体积应最小。

按照以上三条原则所选出来的平行六面体单位称为单位平行六面体。作为空间格子重复单元的单位平行六面体，其特征可用三个棱长 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 以及它们之间的夹角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 六个参数来描述，通常称这六个参数为单位平行六面体常数，见图1-4。根据单位平行六面体常数之间的不同关系，可将它们划分为七种类型，各种类型的特点见表1.1。

单位平行六面体是专对抽象的空间格子而言的，如果在具体的结晶构造中引入相应的划分单位，则这样的单位即称为晶胞。通常晶胞常数以 $a_0$ 、 $b_0$ 和 $c_0$ 以及 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 表示。晶胞是晶体构造的最小重复单元，它反映了晶体的对称性。由于单位平行六面体与晶体中的晶胞相当，因此根据晶胞常数之间的不同关系，可将晶体分为七个晶系。七个晶系及晶胞常数参见表1.1。



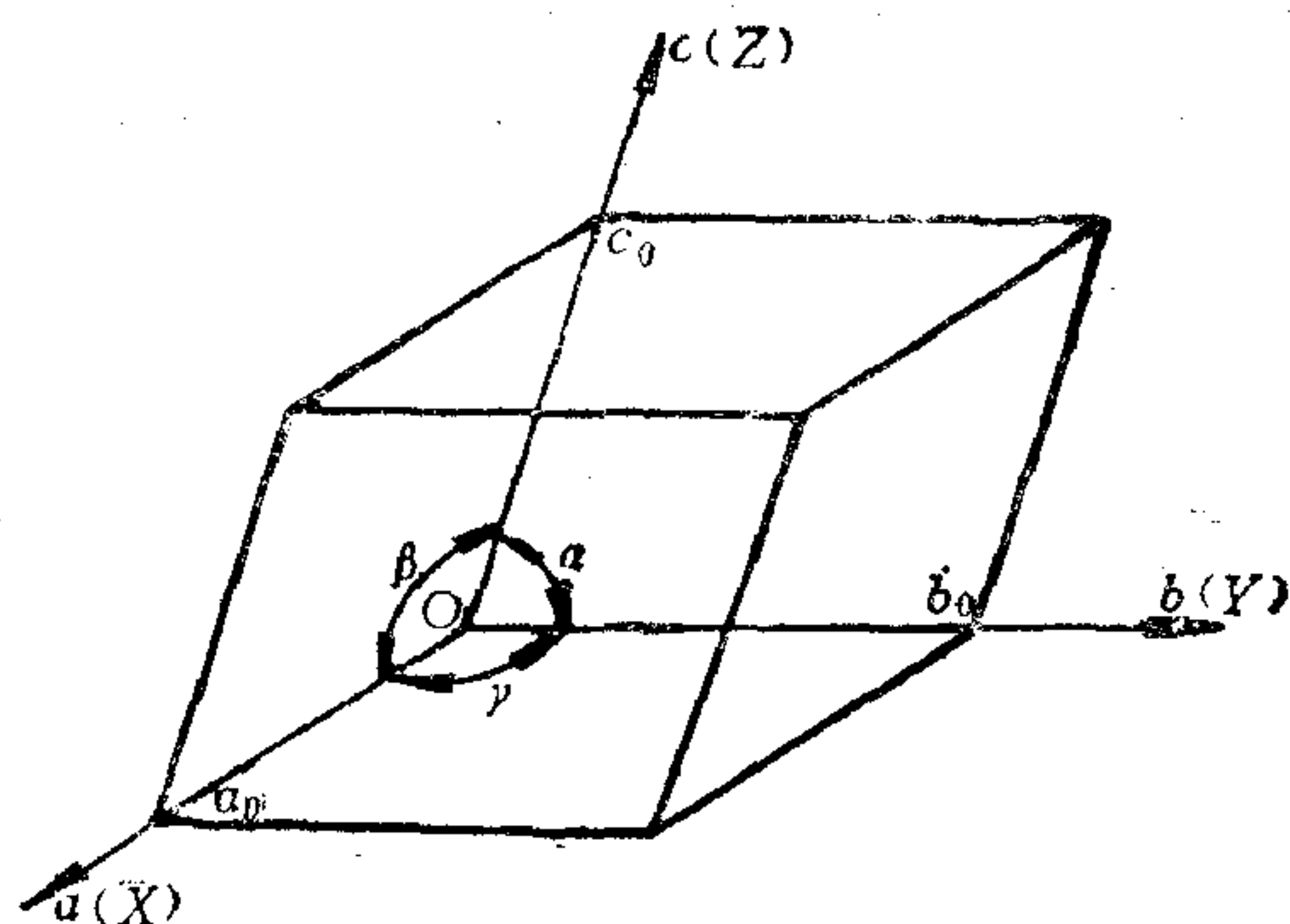


图1-4 晶胞常数

七个晶系及其晶胞常数

表1.1

| 晶 系            | 晶轴上的周期                  | 晶轴间的夹角                                                                     | 独立晶胞常数的项目 |
|----------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 三斜晶系           | $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$                              | 6         |
| 单斜晶系           | $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ | $\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$<br>一般 $\beta > 90^\circ$ | 4         |
| 正交晶系<br>(斜方晶系) | $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                                       | 3         |
| 四方晶系           | $a_0 = b_0 \neq c_0$    | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                                       | 2         |
| 六方晶系           | $a_0 = b_0 \neq c_0$    | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$                            | 2         |
| 三方晶系           | $a_0 = b_0 = c_0$       | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$                                    | 2         |
| 立方晶系<br>(等轴晶系) | $a_0 = b_0 = c_0$       | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                                       | 1         |

如上所述，我们根据单位平行六面体常数将其划分为七个类型，这七类单位平行六面体都具有一个共同的特点，就是只有在顶角上才分布有结点。但实际上有一些空间点阵在选取单位平行



六面体时除在顶角上分布有结点外，同时还需要在体心或面心上分布有结点，才能保证充分符合单位平行六面体的选择原则。于是，各种类型的单位平行六面体一般又可按结点在其中的分布情况而区分为四种可能型式的空间格子。但并不是每一个晶系都独立地具有四种格子形式，经布拉维证明，七个晶系中只能有十四种独立的空间格子，除了这十四种以外，就不可能再推出其它类型的空间格子。这十四种格子通常称为布拉维格子。各晶系可能具有的空间格子形式列于表1.2中。

### 1.1.2 晶体的共性

晶体是具有格子构造的固体。晶体的性质不但取决于它的化学成份，而且还取决于它的几何结构。例如金刚石和石墨的化学组成都是碳原子，但由于内部结构不同，它们的物理特性则完全不同。下面我们撇开晶体的个性(各种晶体的独特性质)，而只讨论晶体的共性(或通性)。晶体的共性就是与晶体的格子构造，或与空间点阵规律有关的基本性质。这些性质可以概括如下。

(1) 自限性。所谓自限性是指晶体具有自发地形成封闭的凸几何多面体的能力。晶体的外表为晶面、晶棱及晶顶等要素所包围，这些要素有以下关系：

$$\text{晶面数} + \text{晶顶数} = \text{晶棱数} + 2$$

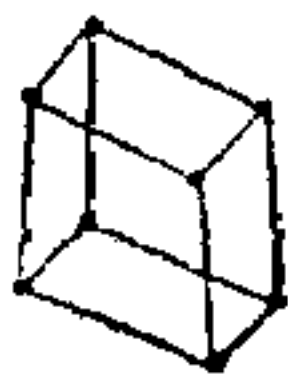
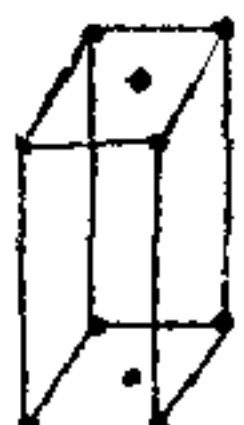
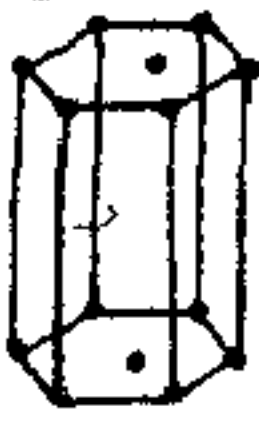
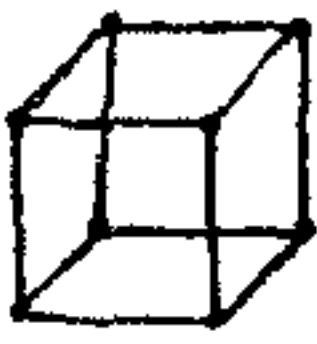
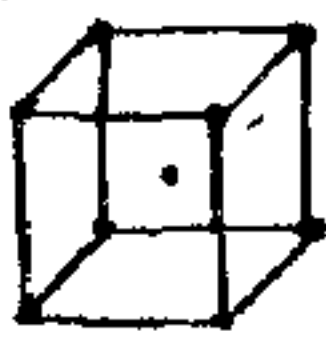
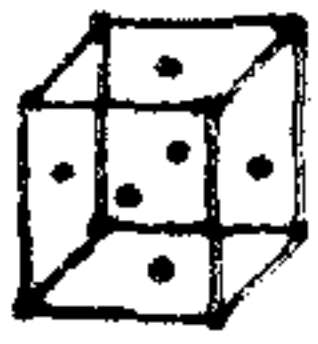
晶体所具有的封闭的几何多面体外形，是晶体内部空间格子构造的外在反映。晶体的产生与成长过程，实质上是质点按照空间格子规律进行规则排列和堆积的过程。因此在晶体生长过程的每一瞬间，一直到晶体停止生长时止，每个最外层的面网，相邻面网相交处的公共行列，以及面网和行列相聚处的公共结点总是表现为规则的几何形态——面(晶面)、线(晶棱)以及点(晶顶)。它们组成一个规则的、封闭的几何多面体。

(2) 均匀性和各向异性。晶体的均匀性是指晶体在同一方向



十四种布拉维空间格子

表 1.2

| 晶系 \ 格子 | 原始 (P)                                                                              | 底心 (C)                                                                               | 体心 (I)                                                                                | 面心 (F)                                                                                |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 三斜      |    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
| 单斜      |   |   | 与C格子相同                                                                                | 与C格子相同                                                                                |
| 正交      |  |  |  |  |
| 四方      |  | 与P格子相同                                                                               |  | 与I格子相同                                                                                |
| 三方      |  |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
| 六方      |  | P格子也可理解为C格子                                                                          |                                                                                       |                                                                                       |
| 立方      |  |                                                                                      |  |  |

的不同部位上具有相同的宏观性质。在宏观观察中，由于分辨能力的限制，物体的微粒性(不连续性)受到掩盖，晶体表现得象一个具有连续结构的物体。由于宏观观察的统计性，测得的性质必然是一个统计平均的结果。而在晶体构造中，所有质点都在三维空间作周期性的重复，在晶体不同部位其质点及排列方式是一样的，这样就使得晶体在任一确定方向上的不同部位的宏观观察



中表现出宏观性质与观察位置无关的特性。

晶体在宏观观察中表现出均匀性的同时，还表现出各向异性的特点。所谓各向异性就是晶体的宏观性质因观察方向而有所差异。例如方解石和云母受力后的破裂(解理)总是沿着一定方向发生。

晶体的各向异性是由晶体结构中各个方向上质点的性质和排列方式不同所引起的。我们以NaCl晶体为例。在图1-5中，沿OA方向是由Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>相间排列而成的，沿OB方向则是全部由一种Cl<sup>-</sup>或一种Na<sup>+</sup>按一定间距排列而成的。而沿OC方向则又是另一种情况。由于晶体的性质在一定的外界条件下取决于成分和内部结构两个因素，既然在不同方向上这两个因素均不相同，这当然要导致性质上的差异。但如果我们作进一步的观察，就会发现，在OA方向及所有与之平行的方向上，其质点的成份和排列方式显然是相同的，因此，在晶体的任一确定方向的不同部位中，在相互平行的方向上，它们的性质总是相同的。这又表现为晶体的均匀性。由此可知，所有结构完整的晶体，均匀性和各向异性都是并存的。

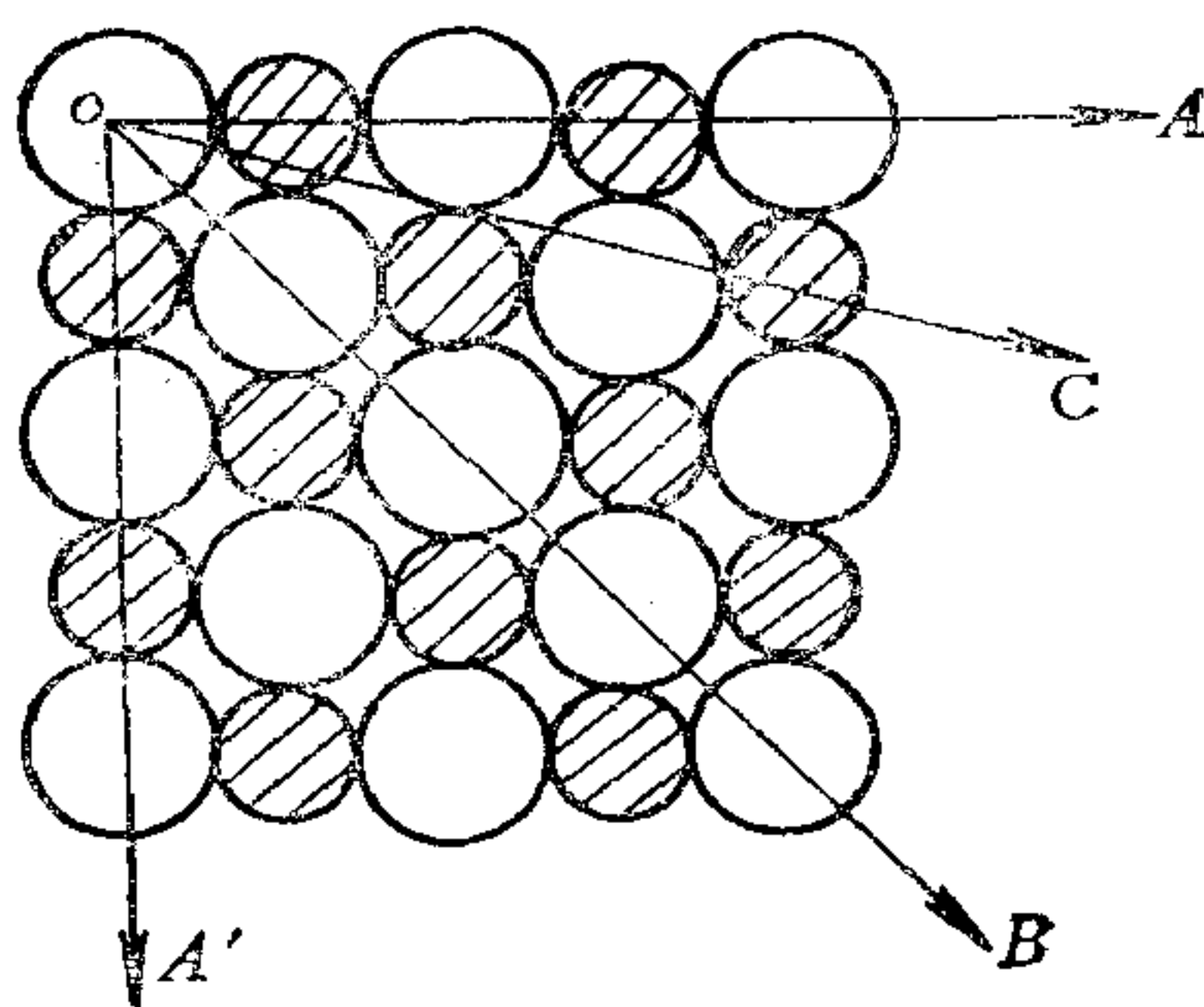


图1-5 晶体的均匀性、各向异性及对称性之示意图(图中画出NaCl晶体结构中的一个晶面，大圆为Cl<sup>-</sup>，小圆为Na<sup>+</sup>)



晶体的某些性质，例如密度，并不具有方向性，对这样的性质来说，晶体是一种均匀的物体。晶体的很多性质，例如折射率、弹性、导电率、压电性等都具有方向性，对于这些性质来说，晶体是一种均匀而各向异性的物体(非均质体)。而非晶质固体的任何物理特性，在各个方向上都呈现出相同的性质，因而称为“均质体”或“各向同性体”。

(3) 对称性。晶体的性质一般说是各向异性的，但这并不排斥晶体在几个特定的方向上可以异向同性。这种相同的性质，在不同方向或位置上有规律地重复出现的现象，称之为对称性。晶体的对称性也取决于晶体的内部空间格子构造。在晶体构造中，不同的方向上质点的性质和排列方式一般是不同的，但也不排斥在几个特定方向上，质点的性质和排列方式是完全相同的，从而表现出完全相同的性质，即表现出对称性。例如图 1.5 中  $OA$  与  $OA'$  这两个互相垂直的方向上必然性质相同。

(4) 最小内能性。任何物体都具有一定的内能，晶体是具有格子构造的固体，其内部质点呈规则的排列，这种规则排列是质点间的引力和斥力达到平衡的结果。也就是晶体中所有的质点皆处于平衡位置，在这种情况下，无论使质点间的距离增大抑或减小都将导致质点的相对势能的增加。这也就意味着，在相同的热力学条件下，晶体的内能最小。另外，由于晶体中处于平衡位置的各质点间作用力是相同的，因而要使晶体中的任何一个质点离开其平衡位置时，该质点本身所具有的动能最小值也都是是一样的，所以晶体在熔化时表现为具有确定的熔点。

晶体的这些共性，是晶体区别于其它非晶质固体的重要特征，也是我们认识晶体的一个重要方面。