

压电石英晶体



国防工业出版社

内 容 简 介

本书较系统地介绍了压电石英晶体理论及其应用。全书分八章。前三章主要介绍石英晶体的内部结构，X光定向，以及介电性质、弹性性质和压电性质；第四、第五和第六章着重介绍振动模式、频率温度特性和电气特性；最后两章介绍石英晶体在滤波器、振荡器、鉴频器和表面波器件等方面的应用。附录中还介绍了坐标变换方法和常用数据。

全书突出了压电石英晶体的物理机理和结构的理论分析，其中部分章节还作了较深入的讨论。本书可供从事压电石英技术工作者阅读，也可供有关科技人员和大专院校师生参考。

压电石英晶体

秦自楷 等编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

太原市晋源印刷厂印装

*

787×1092¹/32 印张 9³/16 193千字

1980年1月第一版 1980年1月第一次印刷 印数：00,001—14,000册

统一书号：15034·1798 定价：0.96元

前 言

自一八八〇年发现石英晶体的压电效应以来，到现在已将近百年了。特别是近几十年，随着无线电电子技术的迅速发展，压电石英技术也得到了迅速发展。现在压电石英器件已广泛地用于通讯、导航、自动控制、彩色电视、电子手表、计测等各个领域。

解放后二十八年来，我国的压电石英技术也得到了迅速发展，并取得了很大成绩。人造石英晶体和石英器件，不论在数量上、质量上以及品种上都有大幅度的提高和增长。为了满足广大的压电石英技术工作者、有关科技人员，以及工农兵群众对压电石英技术知识在普及基础上进一步提高的迫切要求，我们编写了此书。

本书较系统地介绍了压电石英晶体理论及其应用。在内容上，力求突出压电石英晶体的物理机理和结构的理论分析。其中对石英晶体的压电性质、X光定向测角计算、振动模式之间的耦合，以及频率温度特性和电气特性等问题，都作了较深入的讨论。

参加本书编写的还有张仲渊、肖鸣山、宋道仁、王雅轩等同志。在编写过程中，得到了北川无线电器材厂和晨星无线电器材厂等单位的热情支持和帮助，在此表示感谢。

由于我们的水平所限，书中难免会有些缺点和错误，希望广大读者提出批评和指正。

编 者

目 录

第一章 石英晶体的结构	1
§ 1-1 石英晶体的外形、晶轴和直角坐标轴	1
§ 1-2 石英晶体的内部结构	7
§ 1-3 原子面指数	14
§ 1-4 人造石英晶体的培育	19
§ 1-5 石英晶体的缺陷	27
第二章 石英晶体的 X 光定向	32
§ 2-1 X 光定向的物理基础	32
§ 2-2 石英晶片的切型符号	37
§ 2-3 原子面在晶体直角坐标中的方位	41
§ 2-4 石英晶片的方位和定向原子面的选取	49
§ 2-5 X 光测角的计算方法	57
第三章 压电石英晶体的介电、弹性和压电性质	68
§ 3-1 石英晶体的介电性质	68
§ 3-2 石英晶体的弹性性质	73
§ 3-3 石英晶体的弹性常数与切型	85
§ 3-4 石英晶体的压电性质	93
§ 3-5 石英晶体的压电常数与切型	100
§ 3-6 石英晶体的压电方程	105
第四章 石英谐振器的振动模式	113
§ 4-1 伸缩振动模式	113
§ 4-2 弯曲振动模式	118
§ 4-3 面切变振动模式	126

§ 4-4	厚度切变振动模式	129
§ 4-5	振动模式的耦合	133
§ 4-6	能阱模	142
第五章	石英谐振器的频率温度特性	146
§ 5-1	石英晶体的热学性质	146
§ 5-2	石英谐振器的频率温度特性	154
§ 5-3	零温度系数切角	163
§ 5-4	切角、参考温度和各级频率温度系数	172
第六章	石英谐振器的电气特性	185
§ 6-1	石英谐振器的谐振特性和等效电路	185
§ 6-2	石英谐振器电气参数的测定	193
§ 6-3	伸缩振动模式压电振子的电气特性	199
§ 6-4	高频压电振子的电气特性	207
第七章	石英谐振器的应用	213
§ 7-1	石英滤波器	213
§ 7-2	单片石英滤波器	226
§ 7-3	石英振荡器	229
§ 7-4	石英鉴频器	235
第八章	石英表面波器件	239
§ 8-1	声表面波的基本特性	239
§ 8-2	表面波器件的基片与叉指换能器	242
§ 8-3	典型的石英表面波器件	250
附录一	坐标变换	258
§ 1	矢量和二级张量的坐标变换	258
§ 2	弹性常数的坐标变换	265
§ 3	压电常数的坐标变换	276
附录二	石英晶体的数据	279
附录三	石英晶体部分切型的参数	284

第一章 石英晶体的结构

石英晶体又称水晶，是重要的压电材料。它的化学成分为二氧化硅 (SiO_2)，熔点为 1750°C ，密度为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，莫氏硬度为 7。早期使用的是天然石英晶体。由于天然石英晶体产量有限，能用来制造压电器件的就更少，远不能满足电子工业的需要。近一、二十年来用“水热温差法”培育人造石英晶体有很大发展，生长技术日益完善。现在，人造石英晶体的质量完全可以与天然石英晶体比美，已广泛用于通讯、导航、广播、时间和频率标准、彩色电视、电子手表以及小型对讲机等电子设备中。

在大气压力下，当石英晶体的温度低于 573°C 时称为 α 石英；高于 573°C 时称为 β 石英；高于 870°C 时称为鳞石英；高于 1470°C 时称为方石英。 α 石英和 β 石英都具有压电效应。目前广泛使用的是 α 石英，因此，本书所讨论的石英晶体都是指 α 石英。

§ 1-1 石英晶体的外形、晶轴和直角坐标轴

(一) 石英晶体的外形

晶体有天然的，也有人工培育的。在适当的条件下，晶体能自发地生长成具有一定规则的多面体。包围多面体的面称为晶面。晶面与晶面之间的交线称为晶棱。石英晶体的理

想外形，如图 1-1-1 所示。从图中看出：(1) 不论是左旋石英晶体还是右旋石英晶体，它们的理想外形共包括三十个晶面，这些晶面可分成五组，每组六个晶面。即六个 m 面（或称为柱面）、六个 R 面（或称为大菱面）、六个 r 面（或称为小菱面）、六个 s 面和六个 x 面。(2) 左旋石英晶体与右旋石英晶体互为镜象对称。就是说把右旋石英晶体放在一平面镜前，镜内的象就是左旋石英晶体。

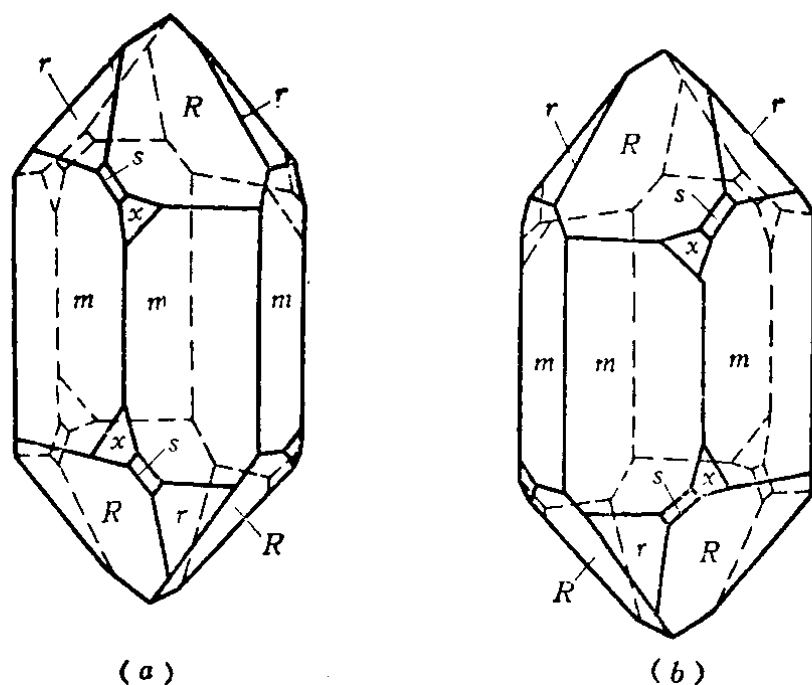


图 1-1-1 石英晶体的理想外形
(a) 左旋石英晶体；(b) 右旋石英晶体。

石英晶体的实际外形，如图 1-1-2 所示。不论是天然石英晶体还是人造石英晶体，由于生长条件不同，它的实际外形也不相同。有的晶面相对变大，有的晶面相对变小，或完全不出现。应该注意，虽然石英晶体的实际外形有所不同，但是两个相应晶面法线之间的夹角恒保持不变。石英晶体各晶面法线之间的夹角数据如表 1-1 所示。

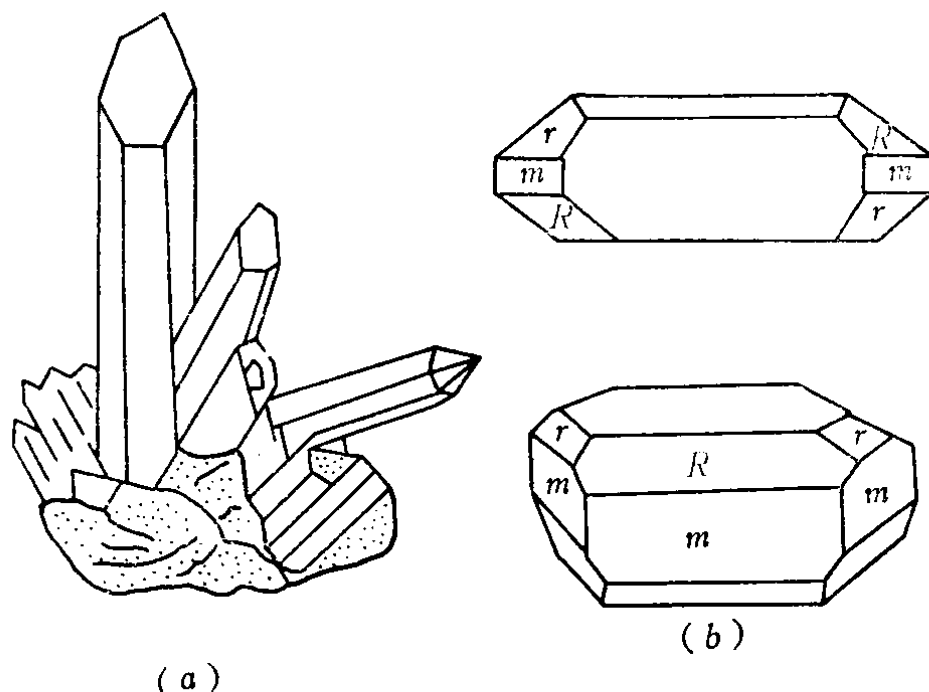


图1-1-2 石英晶体的实际外形

(a) 天然石英晶体；(b) 人造石英晶体。

表1-1 石英晶体各晶面法线之间的夹角计算值和测量值

晶面法线 间的夹角	计算值	测量值	晶面法线 间的夹角	计算值	测量值
mm	$60^{\circ}0'$	$60^{\circ}0'$	Rx	$54^{\circ}51'$	—
mR	$38^{\circ}13'$	$38^{\circ}13'$	Rr	$46^{\circ}16'$	$46^{\circ}18'$
mr	$38^{\circ}13'$	$38^{\circ}13'$	sR	$28^{\circ}54'$	$28^{\circ}58'$
ms	$37^{\circ}58'$	$37^{\circ}55'$	sr	$28^{\circ}54'$	$28^{\circ}58'$
mx	$12^{\circ}1'$	$12^{\circ}1'$	sx	$25^{\circ}57'$	$25^{\circ}54'$

同一种晶体,两个相应晶面法线之间的夹角恒保持不变,这个普遍规律称为晶面角守恒定律。

(二) 石英晶体的对称性、晶轴

从石英晶体的理想外形可以看出,六个 m 面围成一个正六角柱,三个 R 面和三个 r 面交替分布在正六角柱的上部,

另外三个 R 面和三个 r 面则交替分布在正六角柱的下部，如图 1-1-3 所示。其次，还可看出，石英晶体绕其上、下顶点的连线，分别转 120° 、 240° 和 360° 之后，完全恢复原状。这就是说，它有一个三次旋转对称轴，简称为三次轴；同样，石英晶体绕 m 面之间的夹角平分线分别转 180° 和 360° 之后，晶体也完全恢复原状。六个 m 面之间有三个互成 120° 夹角的平分线，所以石英晶体有三个互成 120° 的二次轴，而且二次轴与三次轴垂直。根据上述对称性，即可说明为什么石英晶体中的晶面（如 m 面、 R 面、 r 面等）都是以六个为一组的原因。

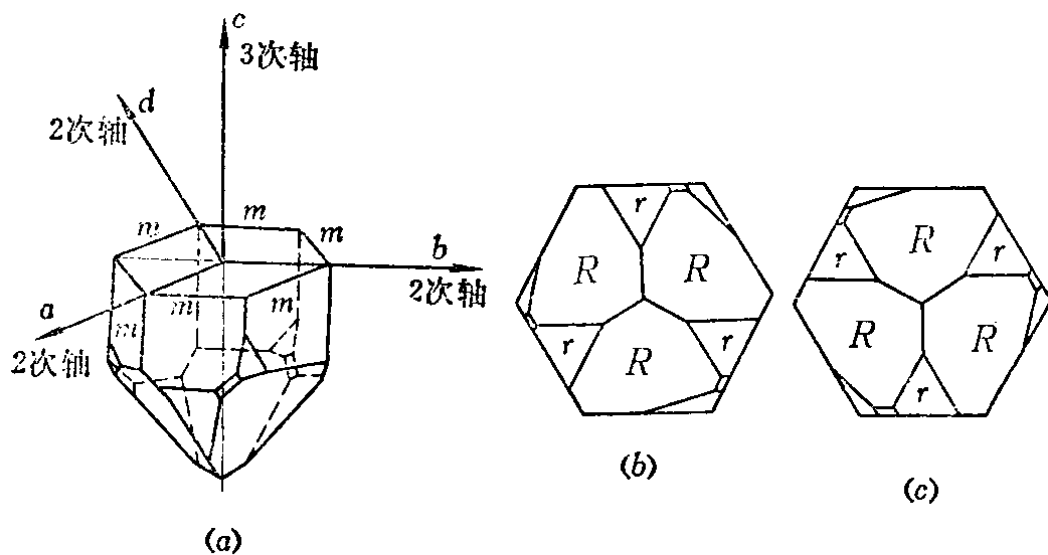


图1-1-3 石英晶体的晶轴和晶面

(a) 石英晶体的四个晶轴和六个 m 面；(b) 正六角柱上部的 R 面和 r 面的分布情况；(c) 正六角柱下部的 R 面和 r 面的分布情况。

在结晶学中，还根据晶体的对称性来确定晶轴。对于石英晶体，常用 a 、 b 、 c 、 d 等四个晶轴来描述它的结构。其中规定： c 轴与三次轴重合或平行（即 c 轴与石英晶体的二个顶点连线重合或平行）； a 、 b 、 d 轴分别与三个二次轴重合或平行（即 a 、 b 、 d 轴分别与 m 面的夹角平分线重

合或平行)。如图 1-1-3 (a) 所示。

(三) 石英晶体的直角坐标轴

讨论晶体的介电性质、弹性性质和压电性质时，采用直角坐标比较方便。所以有了晶轴以后，还要对晶体的直角坐标轴作统一规定。通常选石英晶体的 z 轴与 c 轴平行， x 轴与 a 轴（或 b 轴、 d 轴）平行， y 轴则与 x 轴、 z 轴垂直。或者说 z 轴与石英晶体的两个顶点连线重合， x 轴与两个 m 面之间的夹角平分线重合， y 轴与另两个 m 面的垂线重合。至于坐标轴的指向，在 1949 年 IRE 标准中规定^①：1. 右旋石英晶体和左旋石英晶体都采用右手坐标系。2. 在 x 方向施加压力时，右旋石英晶体 x 轴的正向带正电，左旋石英晶体 x 轴的正向带负电（即左、右旋石英晶体沿 x 轴方向的极性正好相反）。按照这样的规定：直角坐标系 $O-xyz$ 在理

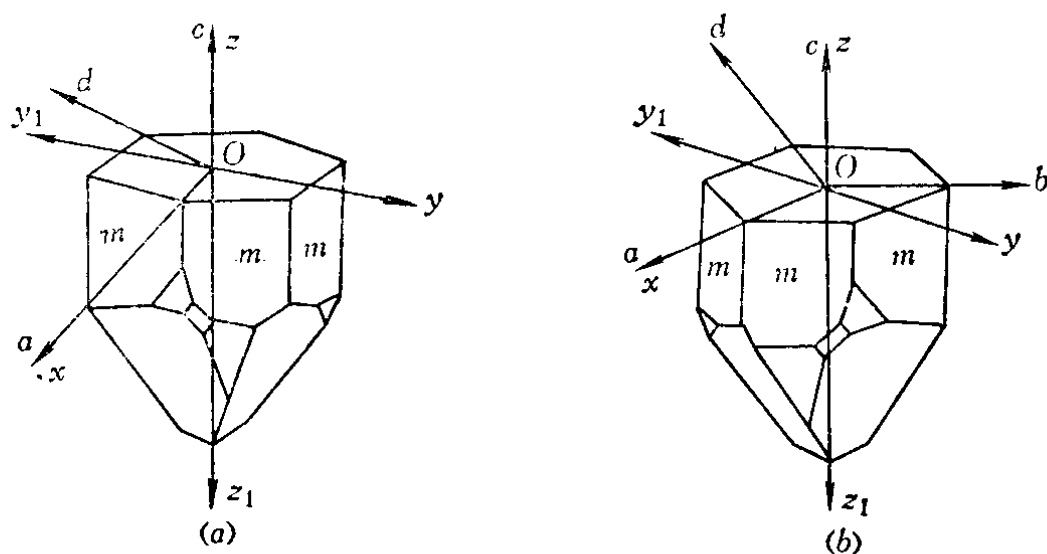


图1-1-4 理想石英晶体的直角坐标系

(a) 左旋石英晶体；(b) 右旋石英晶体。

① 按 1945 年 IRE 标准的规定：左旋石英晶体的 y 轴方向与 1949 年规定的相反，右旋石英晶体的 x 轴方向和 y 轴方向与 1949 年规定的相反。

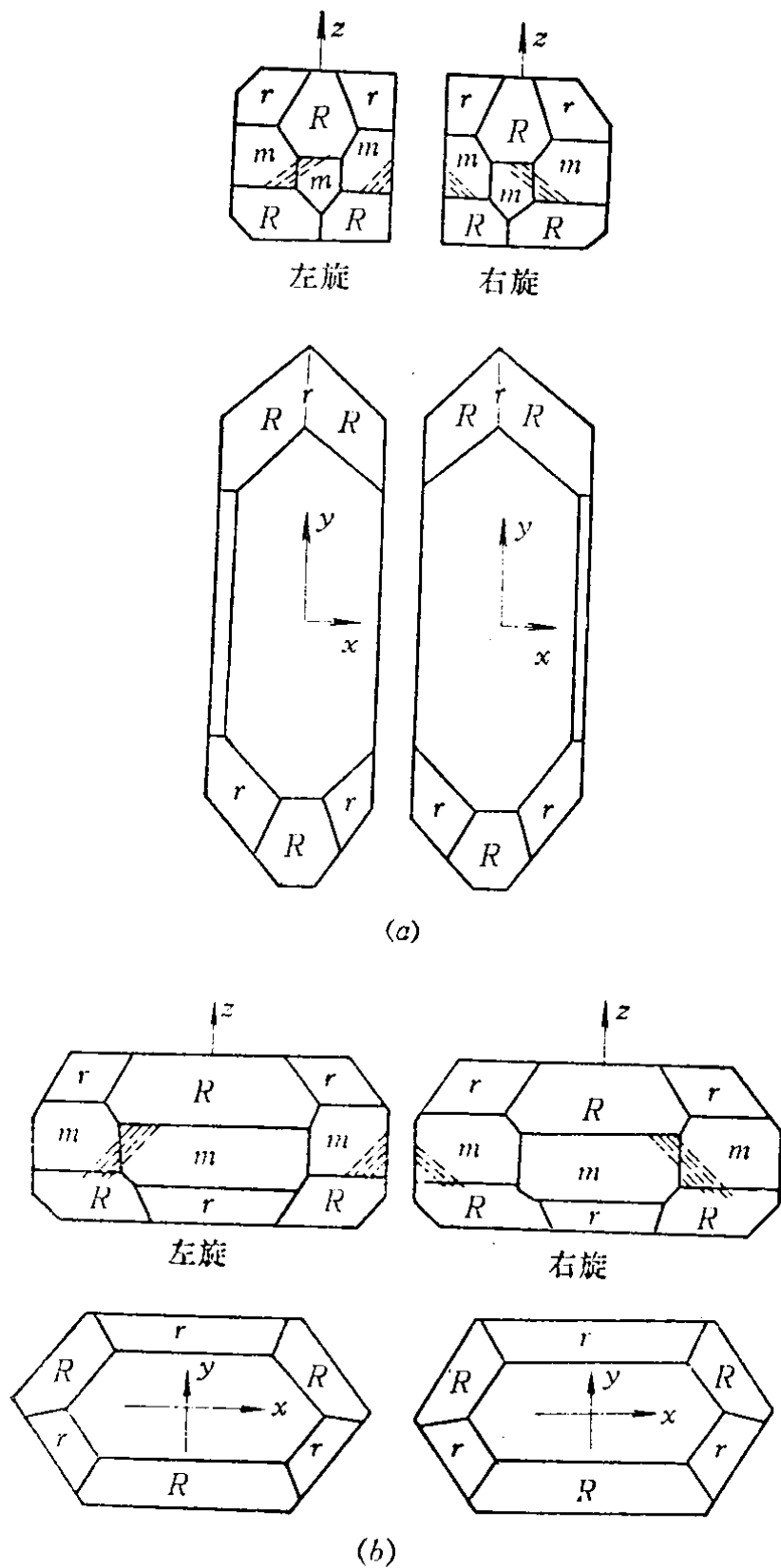


图1-1-5 人造石英晶体的直角坐标系

(a) y棒石英晶体；(b) z块石英晶体。

想石英晶体中的方位,如图 1-1-4 所示;在人造石英晶体中的方位,如图 1-1-5 所示。此外,还应注意:(1) x 轴是二次轴,晶体绕 x 轴旋转 180° 后,完全恢复原状。即图 1-1-4 中坐标系 $O-xyz$ 与 $O-xy_1z_1$ 完全等效,所以 y 轴和 z 轴有两种取向。不论是左旋石英晶体还是右旋石英晶体,从 z 轴(或 z_1 轴)的正向看去, y 轴(或 y_1 轴)的正向总是指向 r 面一边。(2) 有的资料中,左旋石英晶体采用左手坐标系。按照这个规定,在 x 轴方向施加压力时,左旋石英晶体的 x 轴正向带正电。也就是说,在左手坐标系中, x 轴正向与图 1-1-4 和图 1-1-5 中左旋石英晶体的 x 轴方向相反,而 y 轴和 z 轴的方向不变。

石英晶体的 z 轴又称为光轴,光线沿 z 轴方向通过石英晶体时,不产生双折射现象。石英晶体的 x 轴又称为电轴,沿 x 轴方向或沿 y 轴方向施加压力(或拉力)时,在 x 轴方向产生压电效应。石英晶体的 y 轴又称为机械轴,沿 y 轴方向或沿 x 轴方向施加压力(或拉力)时,在 y 轴方向不产生压电效应,只产生形变。

§ 1-2 石英晶体的内部结构

(一) 晶体结构的周期性、晶系

晶体外形上的规律性反映了内部结构的规律性。晶体与非晶体的区别在于:组成晶体的原子(或离子、分子)在空间是有规律性重复排列的,而组成非晶体的原子(或离子、分子)在空间则是无规律性排列的。晶体中的原子(或离子、分子)在空间有规律的重复排列的性质,称为晶体结构的周

期性。图 1-2-1 表示石英晶体与石英玻璃（非晶体）结构示意图。图中“●”代表硅离子，“○”代表氧离子。从图中可以看出，石英晶体中的离子是按周期性排列的，而石英玻璃中的离子则不存在这种周期性。

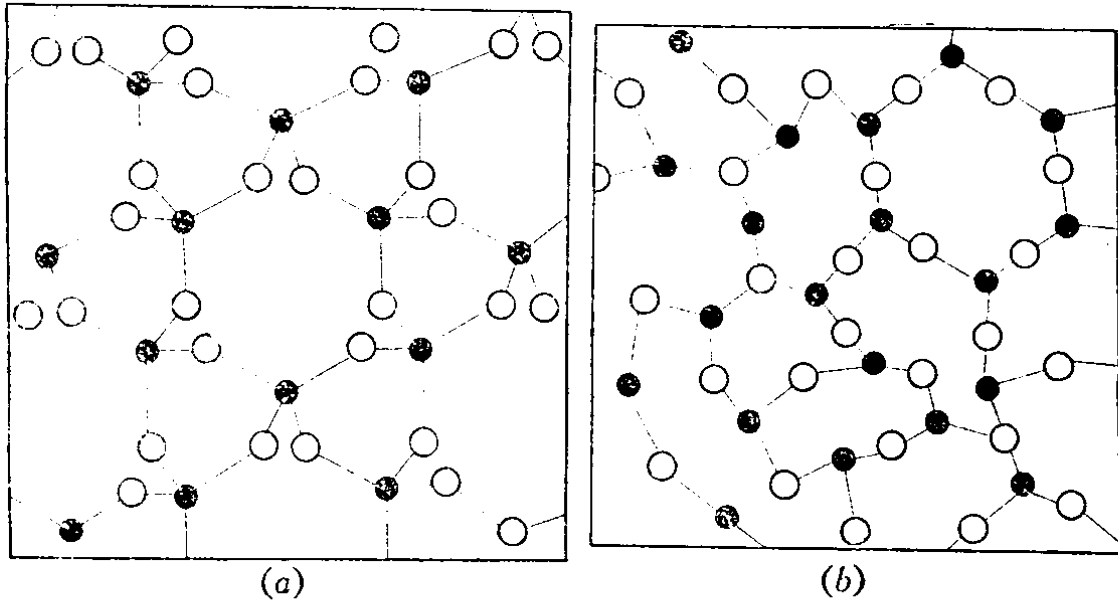


图1-2-1 石英晶体与石英玻璃的结构示意图

(a) 石英晶体；(b) 石英玻璃。

为了描述晶体内部的结构，通常用一些“点子”来代表晶体内的原子（或离子、分子）的重心。通过这些“点子”作三组方向不同的平行线，就构成一个空间格子，称为晶格，如图 1-2-2 所示。从图中看出，整个晶格就是由一个小六面体 ABDE 不断重复排列的结果。这样的小六面体称为晶胞，它是晶体结构的基本单元。晶胞的三个边长 AB 、 AE 、 AD 分别用 a 、 b 、 c 表示，称为晶格常数。晶格沿 a （或 b 、 c ）方向平移 pa （或 qb 、 rc ）距离后（其中 p 、 q 、 r 为整数），仍保持原来的情况。

晶胞的选择方式不是唯一的，如图 1-2-2 中的小六面体

$ABDE$ 和 $FGHI$ 等都可选为晶胞。在结晶学中，晶胞的选择除了要反映晶体结构的周期性外，还要反映晶体的对称性。根据这个要求，晶胞的 a 、 b 、 c 应分别与晶轴平行。

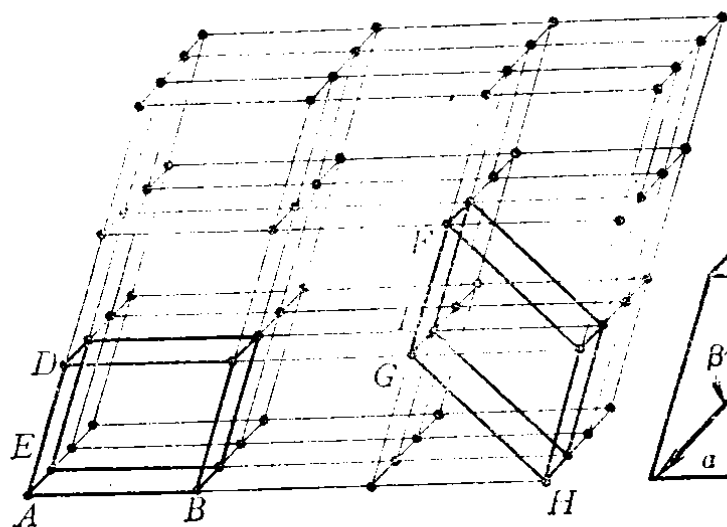


图1-2-2 晶格示意图
 $AB = a$; $AE = b$; $AD = c$ 。

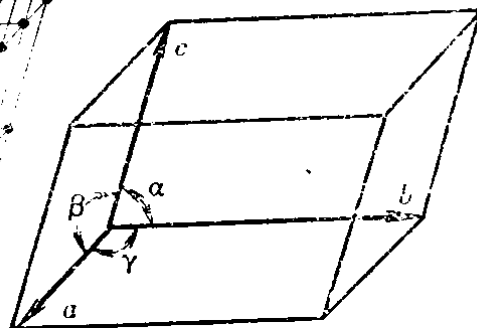


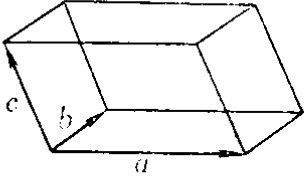
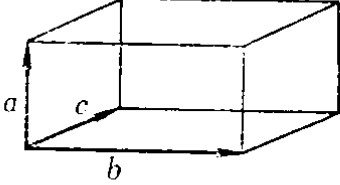
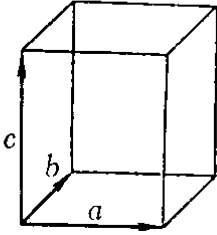
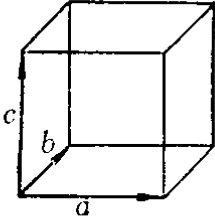
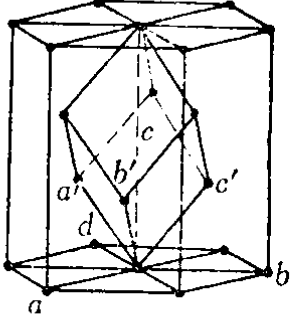
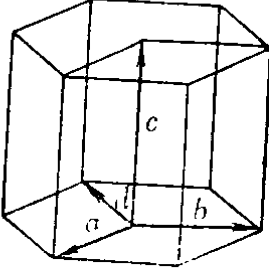
图1-2-3 晶胞示意图

晶胞的大小和形状，由三个边长 a 、 b 、 c 及三个边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来决定，如图 1-2-3 所示。在满足结晶学要求的条件下，根据边长和夹角的不同可分成七个晶系，就是说，客观世界成千上万种晶体可归纳为七个晶系，如表 1-2 所示。应该指出，三角晶胞的夹角 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ ，使用时很不方便，一般都采用六角晶胞来描写三角晶系。三角晶胞与六角晶胞的关系，如表 1-2 所示。

表1-2 七个晶系

晶系	晶格常数及其夹角	晶胞形状
三斜晶系	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

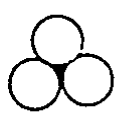

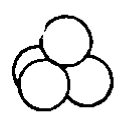

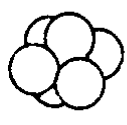

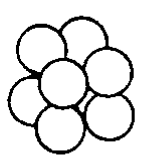
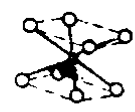
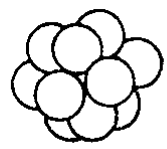
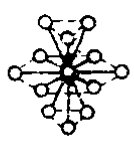
(续)

晶系	晶格常数及其夹角	晶胞形状
单斜晶系	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$	
正交晶系	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
四方晶系	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
立方晶系	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
三角晶系	三角晶胞 $a' = b' = c'$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ 六角晶胞 $a = b = d \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
六角晶系	$a = b = d \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	

(二) 石英晶体的内部结构

石英晶体是由硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 组成的。如果把不同的离子看成是一些半径不同的小球，则整个晶体就可认为是由许多有规则排列的小球紧密堆积而成。在离子型晶体中，只有当正、负离子紧密接触时，晶体才是稳定的。为了使正、负离子能紧密接触，就要求正、负离子半径的比值必须满足一定的条件，如表 1-3 所示。

表1-3 离子半径比与结构的关系

正负离子半径比 r_+/r_-	结 构 类 型		
0.155~0.255	三 角 形		
0.255~0.414	四 面 体		
0.414~0.732	八 面 体		
0.732~1.00	立 方 体		
1.00	最密堆积		

构成石英晶体的硅离子 Si^{4+} 的半径为 $r_+ = 0.39 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米), 氧离子 O^{2-} 的半径 $r_- = 1.34 \text{ \AA}$, 两者之比为 $r_+/r_- = 0.291$ 。从表 1-3 中看出, 石英晶体中的硅、氧离子形成四面体结构, 即每个硅离子被四个氧离子所包围。

一个氧四面体代表一个二氧化硅 SiO_2 分子, 而且二氧化硅分子的重心又正好与硅离子重合, 因此, 只要知道了硅离子分布情况, 就可了解石英晶体的内部结构。右旋石英晶体的硅离子分布情况如图 1-2-4 所示。图 (a) 表示六角晶

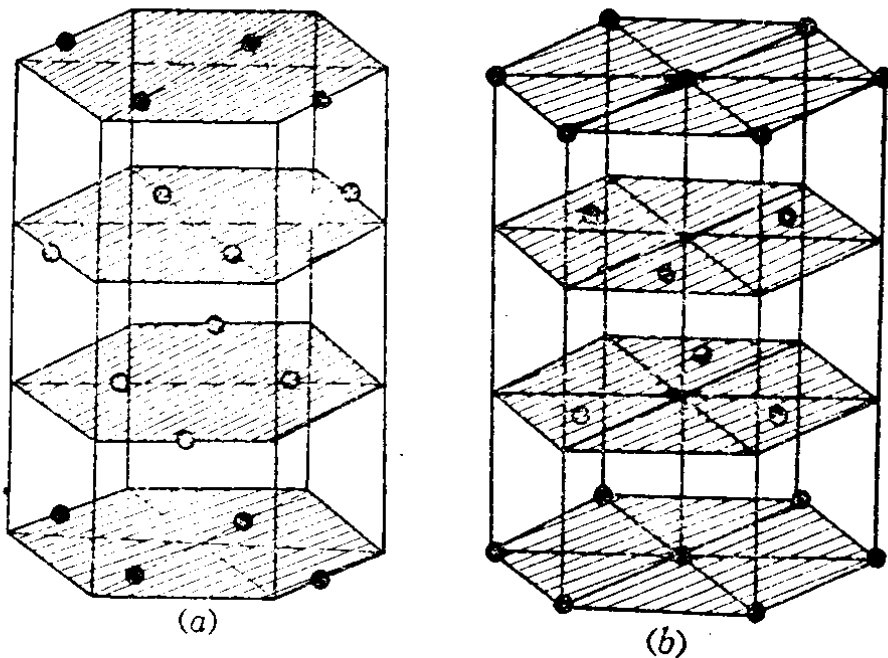


图1-2-4 右旋石英晶体的硅离子分布

(a) 六角晶胞; (b) 以硅离子为顶点的六角晶胞。

胞中硅离子的分布; 图 (b) 表示以硅离子为顶点的六角晶胞。从图中看出, 硅离子的分布可分三层。层与层之间的距离为 $c/3$, 其中, “●” 代表下层硅离子, 高度为零; “⊖” 代表中层硅离子, 高度为 $c/3$; “⊕” 代表上层硅离子, 高度为 $2c/3$ 。晶格常数为 $c = 5.394 \text{ \AA}$, $a = b = d = 4.904 \text{ \AA}$ 。图 1-2-5 表示左旋石英晶体和右旋石英晶体的硅离子在 z 平