

滑

压电材料测量标准

译文选辑

六机部七院第七〇六研究所 合编
中国科学院湖北物理研究所

前 言

以英明领袖华主席为首的党中央，高举毛主席的伟大旗帜，抓纲治国，我国社会主义革命和社会主义建设出现了蓬勃发展，欣欣向荣的大好局面。科学大会的强劲东风，吹响了赶超世界科技先进水平的进军号角。为了实现将我国迅速建成现代化强国的宏伟目标，适应形势的发展和科研生产的需要，以及配合国内有关标准的制定，我们选编了这本“压电材料测量标准译文选辑”。

本选辑系统地汇集了1949年——1976年在125兆赫以下的频率范围内有关压电晶体和压电陶瓷的测量标准。其中包括 IRE（美国无线电工程师协会）和 IEC（国际电工委员会）标准各四篇，以及美国军用压电陶瓷标准一篇。IRE 现名 IEEE（美国电气、电子工程师协会），因此上述 IRE 49年、57年、58年、及 61年标准也依次编号为 IEEE 176、IEEE 177、IEEE 178、IEEE 179。同时，这四篇标准作为美国国家标准，按 ANSI（美国国家标准学会）系统分别编为 ANSI C83.3、C83.17、C83.237、C83.24。IEC 分工制定有关电气和电子工程技术方面的国际标准。IEC 标准以推荐的形式提供各国使用，IEC TC 32-49（与压电材料有关的技术委员会）1968年—1976年共制定了四个压电晶体和压电陶瓷测量国际标准（见 IEC 288、302、444、483公报）。从这些标准中，我们可以了解有关压电材料测量国际标准化工作方面目前的现状和发展趋势。本书还同时适当收集了与这些标准有关的补充资料，以及近年来国外发展和改进压电材料测量方法的文章。

本译文选辑仅供有关工作人员参考，故未对原文内容作必要的审订和删节。译文中有名词语尽可能作到基本一致。由于水平有限，时间仓促，编选和译校工作中，错误和不当之处在所难免，欢迎批评指正。

编 者

一九七八年三月

目 录

一、IRE 标准

1. 压电晶体 IRE 标准(1949年)..... (1)
2. 压电晶体 IRE 标准——压电振子定义和测量方法
(1957年)..... (28)
3. 压电晶体 IRE 标准——弹性、压电和介电常数——机
电耦合系数的测定(1958年)..... (36)
4. 压电晶体 IRE 标准——压电陶瓷的测量(1961年)..... (56)
附1: 厚度谐振子中由于大机电耦合所引起的谐振频
率位置的漂移(1963年)..... (68)
附2: 极化铁电陶瓷圆板泊松比的测量(1963年)..... (79)

二、IEC 标准

1. 283号公报——滤波晶体部件的寄生共振频率及其等
效电阻的测量方法(1968年)..... (82)
2. 302号公报——工作频率至 30 兆赫压电振子的测量
方法和标准定义(1969年)..... (89)
附: 压电振子参数的测量方法(1958年) (103)
3. 444号公报——用 π 型网络中的零相位技术测量
石英晶体部件的共振频率和等效串联电阻的
基本方法(1973年)..... (115)
4. 483号公报——具有高机电耦合的压电陶瓷的动
态测量指南(1976年)..... (124)
附: 高频压电材料的特性测量(1974年) (145)

三、美国军用标准 (MIL—STD 1376)

声纳换能器用压电陶瓷军事标准(1970年)..... (158)

附: 压电陶瓷圆环的低电场特性(1975年) (166)

四、其 它

1. 铁电陶瓷中各参数的精确测量(1969年) (180)

2. 具有大变化泊松比的压电陶瓷材料的径向模耦合因子
的定义和测量(1973年)..... (195)

3. 精确测定压电陶瓷材料系数的实部和虚部
的迭代方法(1976年)..... (206)

一、IRE 标准

压电晶体 IRE 标准

(1949)

引言

1945年, IRE发布了由压电晶体委员会制定的题为“压电晶体标准: 推荐术语”的报告。该报告不仅包括大量的新材料, 而且还修订了早期报告的某些部份。

1945年报告的第一部份(相当于本标准第1部份), 对于左旋晶体采用左手坐标轴现已删去(见1.9节和1.11至1.14节), 而45年关于旋转面的规定已用本标准中的新规定代替, 除此之外, 1945年报告的其余部份则保持未变。

第二部份(相当于本标准第2部份)中第11和第13节已经修订。此外, 第二部份实际上保持原状。由于新晶体的引入, 使存在的规则不能满足某些所属的晶类, 因而希望有套独立的规则, 足以广泛地包括所有的压电晶体的晶类。这就需要在石英轴的定义和压电、弹性常数的代数符号上作某些改变, 如在1.12至1.14节所述。这些变化的结果不仅与结晶学家的结果相一致, 而且, 也与实际上已经发展了的情况相一致。

新标准第3部份提出了压电理论的基本方程式、符号和单位。鉴于表示弹性应力和应变与电位移的关系而不是与电场的关系已有发展的趋势, 而且也由于日益增加地采用MKS单位, 在晶体与电极间存在间隙的情况下, 以电位移来表示的方程式是特别有效的, 这也涉及晶体常数明显地依赖于温度的晶体。在后一种情况下, 发现“常数”当以电位移表示时, 较之以电场表示时具有更近似的常数值。

当晶体和电极间不存在间隙时, 通常发现采用Voigt公式更方便些, 这时, 宁可用电场强度来表示压电常数, 也不用电位移来表示。

方程式是可以互换的。Voigt压电常数的 d 和 e , 通过介电常数与更新的常数 g 和 h 有关。对某些目的来说, 采用包括两种公式常数的组合是方便的, 当然, 这就需要采用相同的单位制, 静电单位或实用单位制。

1. 压电晶体轴的定义

1.1. 晶体及其分类

为了指导那些不熟悉结晶学的人, 下面概述某些基础知识, 对本标准后面将要进行的论述可能会有所帮助。

术语“晶体”适用于那些结构对称的固体。在晶体中，原子可想象为存在于小群内，所有的群完全相似、同样取向、并且有规律地排列于所有三维方向上。若每个群被当作是一个平行多面体的界限，后者可以看作是晶体的一个基本结构单元，它们在所有三维方向之间无任何空间、密堆集在一起，这样一个结构单元就叫做“晶胞”。因为构成晶胞的原子特殊位置的选择是任意的，显然地，晶胞的大小和形状有较宽的选择范围。实际上，最简单地选定的晶胞是与实际的晶面和 X—射线衍射有关，且具有晶体本身的对称性。除了几种特殊情况外，晶胞具有最可能小的尺寸。

依据它们对称性的程度，晶体通常划分为七个晶系：三斜（对称性最差）、单斜、斜方、四方、六方、三方和立方。也有些研究者将三方划入六方晶系。

七个晶系，又根据它们相对于点的对称性依次划分为点群（晶类）。有32个这样的晶类，其中12种晶类因其对称程度太高而不显示压电性。于是其余20种可以认为是压电性的。每个晶系至少包括一个压电性晶类。

1.2. 概 述

对许多新晶体确定适当的命名法，来发现其是否属于压电领域的方法，看来，利用高度发展的结晶学的科学命名法是明智的。这就便于采用结晶学家已记录的数据资料。这样的数据，例如，元胞大小和角度、光学性质、界面角，所有这些对于确定压电板的方向都是有利的。在结晶学里，晶体的性质是依据晶体本身所提供的自然座标系统来描述的。这些自然座标系统的轴就是晶胞的边棱。在立方晶体中，这些轴是等长的，且互相垂直。在三斜晶体中，则是不等长的，且没有两个边是互相垂直的。

任何晶面都是平行于这样一个截面，该截面在自然轴 a 、 b 、 c 上的截距为单位距离的简单整数倍，不然就是无穷大，因而其倒数当乘以小公因子时，全都是小整数或为零。这些就是面的指数。在这个命名法中，我们有，例如，(100)、(010)、(001) 面，也分别叫做 a 、 b 、 c 面，在斜方、四方和立方晶系中，这些面垂直于 a 、 b 、 c 轴，其它如，(111) 面（单位面），(121) 面等等，当借助一组直角坐标轴 x 、 y 和 z 时，除了立方晶系外，一般来说，这些指数是不合理的。

另一方面，对压电应用基础的电学和弹性的理论分析，大多采用直角坐标系。所以，结晶学的 a 、 b 、 c 轴与直角坐标系的 x 、 y 、 z 轴之间允许采用某种任意的关系。除非在此领域里的所有研究者同意采用相同的命名法，否则将造成很大的混乱，即按一种 $abc-xyz$ 关系表示的数据与按另一种 $abc-xyz$ 关系表示的同样数据看起来就非常不同。

1.3. 三斜晶系

在晶体中，如果既不存在对称轴，又不存在对称面，它就是三斜晶系。三个轴的长度通常是不等的，其夹角 α 、 β 和 γ 也是不等的。 α 、 β 、 γ 分别是 b 与 c ， c 与 a ， a 与 b 轴之间的夹角，如图 1 所示。图 2 是一个三斜晶体， a 轴具有 b 、 c 面交线的方向（需要时是延长面相交）， b 轴具有 c 、 a 面交线的方向， c 轴具有 a 、 b 面交线的方向。按照最通常的习惯，这样定 a 、 b 、 c 轴的正方向，即令 α 大于 90° ， β 也大于 90° 。所有的轴都按这个惯例来唯一地确定正方向。（许多老资料记的是余角、例如把 $-\alpha$ 和 $+c$ 之间的夹角定为 β 角。） a 、 b 和 c 轴通常选取三个最短的非共面的原子相互间的距离，以 c 为最短单位距离， b 为

最长单位距离。

1.3.1. x 、 y 、 z 轴

最合逻辑的关系是 x 、 y 、 z 轴分别地与 a 、 b 、 c 轴完全重合。有六个等同的简单而又完整的说明方法： x 沿 a 、 y 在 ab 平面； x 沿 a 、 z 在 ac 平面； y 沿 b 、 x 在 ab 平面； y 沿 b 、 z 在 bc 平面； z 沿 c 、 y 在 bc 平面；或者 z 沿 c 、 x 在 ac 平面。在物理学和工程技术中， z 通常画作垂直轴，而在结晶学中则通常将 c 轴这样画。所以，我们使得 z 轴沿 c ，而且只选取 y 在 bc 面，或 x 在 ac 面。现在接受的选择是让 y 垂直于 ac 面，这自动地置 x 于 ac 平面。

定直角坐标轴及其正方向的规则，概要如下：（参看图 1 和 2）

+ z 平行于 + c ，因而平行于 (100) 和 (010) 平面。

+ x 在 ac 平面垂直于 c 轴，通常指向 + a 的方向，因此 x 平行于 (010) 平面。

+ y 垂直于 ac 平面 (010) 通常指向 + b 方向，与 z 和 x 成右手坐标轴系。

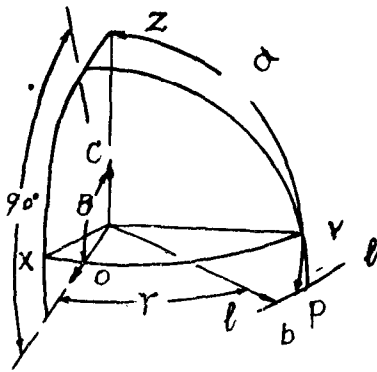


图 1 三斜晶体的轴系
线 $l-l$ 在极轴 z 、夹角 α 的小段圆弧上， b 在 p 的左边 $\gamma < 90^\circ$ b 在 p 的右边 $\gamma > 90^\circ$ 。

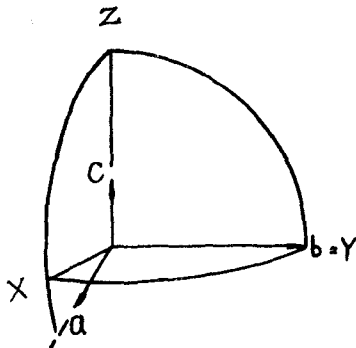


图 3: 单斜晶体的轴系 a 和 c 轴垂直于 b 轴，但 a 与 c 彼此不垂直。

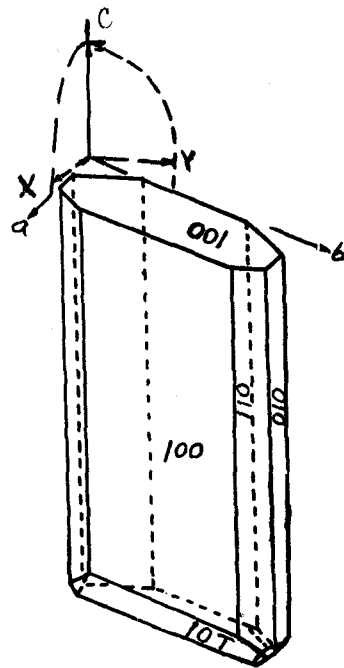


图 2 右旋酒石酸氢氨基乙基乙醇胺 (AET)，三斜晶系，晶类 1
 x 轴沿 c 、 y 垂直 (010) 面， x 垂直于 y 和 z 。

1.4. 单斜晶系

如果晶体只有单一的二次对称轴，或者只有单一的对称面，或者二者兼有，就属于单斜晶系。取二次对称轴或取对称面的法线作为 b 轴（如果二者都存在，它们是相同的，在任何情况下，这个方向就叫做单轴）。其余两个轴，现代结晶学家通常让 c 较小。+ a 和 + c 间的夹角 β 角通常是钝角，（一个特例是只在某些温度是钝角，而在其他温度则是锐

角)。这个惯例对于 2 和 2/m 晶类都唯一地确定了所有轴的正方向。在 m 晶类则有两个可选择的方法。它们二者间的选取叙述在 1.16 节。因为早期工作者选定的轴不可能提供最小的可能晶胞，现在则可以选取较小体积的晶胞。

许多物理学家似乎宁愿让 z 轴作为单斜晶系的单轴。这个习惯被 Voigt 采用，以后又由 Cady 在他的“压电学”^[1]一书中继续采用。尽管如此，在大多数结晶学文献中，仍把 b 轴作为单斜晶系的单轴。此后，“ z 沿 c 、 y 沿 b ”，对单斜晶系来说是标准的 $abc-xyz$ 关系，如图 3 说明的，按照这个习惯，以单轴 b 作为 y 轴，有关应力 T 和应变 S 的关系，通过矩阵方程 $S = sT$ 和 $T = cS$ 来表示，这里弹性顺性 s 取以下形式：

$$s = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & s_{15} & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & s_{25} & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & s_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & s_{46} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{46} & 0 & s_{66} \end{vmatrix} \quad (1)$$

刚度常数 c 取相似的形式。还有，有关电位移和弹性应力的关系也可通过矩阵方程式 $D = dT$ 来表示，这里压电应变常数 d ，对于晶类 2 (y 是二次对称轴) 取以下形式：

$$d = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{vmatrix} \quad (2)$$

而对于晶类 m (对称面垂直于 y 轴)：

$$d = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

矩阵 (1)、(2) 和 (3) 代替了按照 Voigt 习惯至今仍被采用的那些表示式。按新的规则每个弹性或压电常数的相同的数值与老的——相对应。

为了与新矩阵 (1)、(2) 和 (3) 相比较，现给出按照 Voigt 习惯的表示式。对于弹性顺性的 Voigt 矩阵具有类似于 c 的形式，现已弃而不用。

$$s = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & s_{36} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & s_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{45} & s_{55} & 0 \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & 0 & 0 & s_{66} \end{vmatrix} \quad (4)$$

对于具有二次对称轴的晶类 2 来说，Voigt 矩阵 (在这里 z 轴是二次对称轴)，现在已弃而不用，是：

$$d = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{vmatrix} \quad (5)$$

而对于具有对称面的晶类 m （对称面垂直于 z 轴），Voigt矩阵现在也弃而不用，是：

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \quad (6)$$

如果知道了按Voigt习惯的 s 和 d 矩阵，我们可以借助下述矩阵令它们成为标准形式：

$$s = \begin{pmatrix} s_{22}' & s_{23}' & s_{12}' & 0 & s_{26}' & 0 \\ s_{23}' & s_{33}' & s_{13}' & 0 & s_{36}' & 0 \\ s_{12}' & s_{13}' & s_{11}' & 0 & s_{16}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}' & 0 & s_{45}' \\ s_{26}' & s_{36}' & s_{16}' & 0 & s_{66}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{45}' & 0 & s_{44}' \end{pmatrix} \quad (7)$$

在矩阵（7）中，加撇足标的值都是依照Voigt矩阵得到的。

单斜，晶类2：

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{25}' & 0 & d_{24}' \\ d_{32}' & d_{33}' & d_{31}' & 0 & d_{36}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24}' & 0 & d_{14}' \end{pmatrix} \quad (8)$$

单斜，晶类 m ：

$$d = \begin{pmatrix} d_{22}' & d_{23}' & d_{21}' & 0 & d_{26}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{35}' & 0 & d_{34}' \\ d_{12}' & d_{13}' & d_{11}' & 0 & d_{16}' & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

单斜晶体的实例示于图4、5和6。

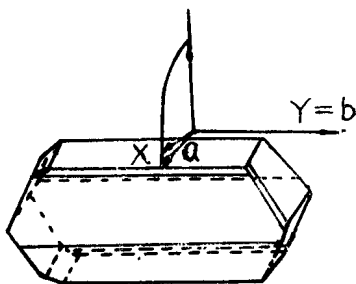


图4 硫酸锂(单水合物)，单斜晶系，晶类2，这里示出左旋样品，沿 b 轴伸张， $+b$ 端为负电荷

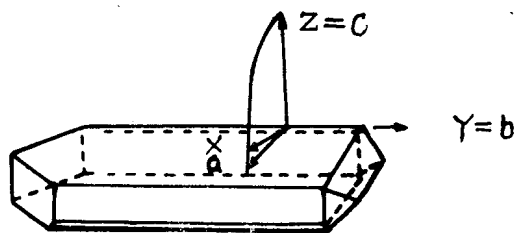


图5 右旋酒石酸乙烯二铵(EDT)，单斜晶系，晶类2沿 b 轴伸张， $+b$ 端成为正电荷。

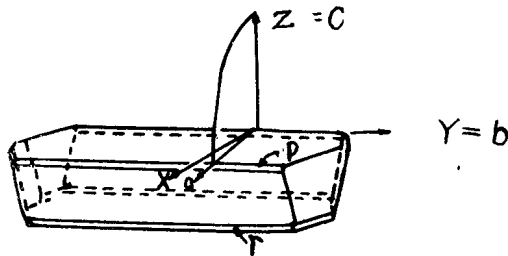


图6 右旋酒石酸二钾(DKT)单斜晶系，晶类2沿 b 轴伸张， $+b$ 端成为正电荷。

1.5. 斜方晶系

晶体具有三个互相垂直的二次对称轴，或者两个互相垂直的对称面，或者二者兼有，就属于斜方晶系。（斜方晶系又称正交晶系——译者注）。其晶胞是具有不等长的 a, b, c 轴的直角平行多面体，其单位距离 $c_0 < a_0 < b_0$ 。任何两轴的任意端可取为正方向，而与第三轴的固有方向形成右手坐标系。下述习惯已普遍采用：“ x 沿 a 、 y 沿 b 、 z 沿 c ”。

（斜方晶体的实例是罗谢尔盐，示于图7）。

1.6. 四方晶系

具有单一四次对称轴（或四次象转轴）的晶体，属于四方晶系。通常是沿该四次对称轴取 c 轴，而 z 轴位于沿 c 轴方向。 a 和 b 轴是等同的，通常称为 a_1 和 a_2 。 x 轴可以平行于 a_1 或 a_2 中任一个，即图8中 a 或 b 的任一个。因此 x 和 y 轴有两个可能的位置。

a 轴的定向即 x 轴的方向并不如此容易解决。四方晶系有七个晶类，其中五个有压电性，这些晶类是 $\overline{4}$ ， 4 ， $\overline{4}2m$ ， 422 和 $4mm$ 。这其中有三个没有二次对称轴以指导选定 a 轴。而且，除 $\overline{4}2m$ 以外其它全都没有一个使晶胞体积最小的方法来选定 a 轴。在具有一个二次对称轴的 $\overline{4}2m$ 晶类，最小晶胞其 a 轴不可能平行于该二次对称轴。具有 $\overline{4}2m$ 对称性的物质有12种可能的排列（空间群）。这12个空间群中，6个当 a 轴是二次对称轴时有最小晶胞，另6个 a 轴与二次对称轴成 45° 相交（仍垂直于 c 轴）也有最小晶胞。在“测定晶体结构的国际常数表”中，优先选定是：“ a 轴沿二次对称轴”，因此不采用最小可能的晶胞。对压电性研究来说，这种选定比其最小晶胞的选定更方便些。因为有这样的先例，假定 a 位于沿二次对称轴，这里似乎真有点矛盾。

简要的说，所有四方晶系可以说都有二次对称轴，这些轴之一取为 a 轴。当没有二次对

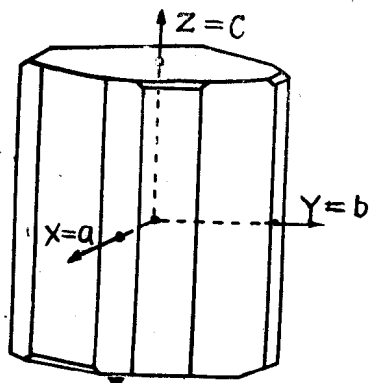


图7 罗谢尔盐、斜方晶系，晶类222。

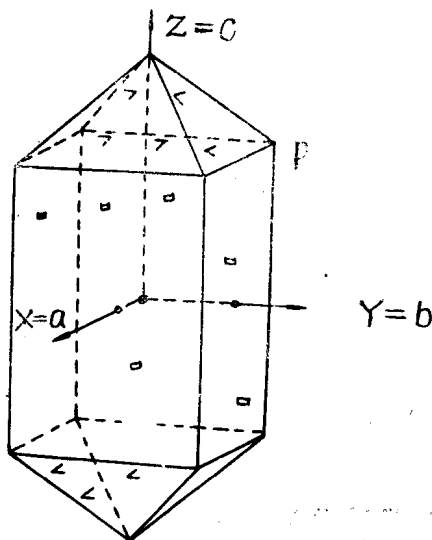


图8 磷酸二氢铵 (ADP) 磷酸二氢钾 (KDP)

四方晶系晶类， $\overline{4}2m$

沿 pp 对角线伸张， $+z$ 端成为负电荷，示出了对不同表面典型的腐蚀图。

称轴时, a 轴平行于最小晶胞的两个相等轴之一。取 c 轴的任意端为正方向, 其次采用1.16节作为引导 a 轴的方向, 如在 $\overline{4}2m$ 晶类中, a 轴就如此选定。

$+z$ 和 $+x$ 分别与 $+c$ 和 $+a_1$ (或 $+a_2$) 轴重合。 $+y$ 轴完全根据右手直角坐标系来定。

1.7. 用于ADP型晶体

磷酸二氢铵 (ADP, 图8), 磷酸二氢钾(KDP), 及铵和钾的磷酸二氢盐都是 $\overline{4}2m$ 晶类。因为, 这些晶体需要确定 a 轴的正方向的特殊面, 通常是并不存在的, 故采用下述经验定则。基于这个事实, 在 c 方向极化的晶体, 沿 a 和 b 轴 45° 方向压缩, 引起 c 轴两端出现相反的电荷, 沿同样方向拉伸则出现电荷符号反向。

这个定则是将拉伸 (伸张) 方向而引起 z 轴出现正电荷的一端选定为正端, x 和 y 轴的正方向之间将位于象限内。

轴的正方向显然有两种选择, 因为当两轴是相反时, 该定则仍就适合。该定则与1.16节(4)和(9)相一致。

1.8. 六方与三方晶系

这些轴系由六次(或三次)对称轴辨别, 这个轴通常做 c 轴。按照最通常采用的Bravais—Miller轴系, 它们有三个相等的二次对称轴, a_1 、 a_2 和 a_3 , 在垂直于 c 轴的平面内以 120° 角分开。这些轴的选定或是平行于二次对称轴, 或是垂直于对称面。若既没有二次对称轴垂直于 c 轴, 又没有对称面平行于 c 轴, 则 a 轴的选定以给出最小晶胞为宜。

按照现有的习惯, z 轴平行于 c 轴, x 轴与任一个 a 轴的方向重合, y 轴垂直于 z 轴和 x 轴, 这样取向以便形成右手坐标系。这个定则适合于左旋和右旋晶体。

电气石的轴向示于图9。

1.9. 用于石英晶体

按现行习惯的轴向示于图10。具有左或右旋石英两者的 x 、 y 、 z 轴形成右手坐标系。这些变化①对于弹性和压电常数的符号和对称轴公式上的影响在1.12节讨论。

1.10. 立方 (等轴) 晶系

三个等轴 a 、 b ($=a$) 和 c ($=a$), 通常称做 a_1 、 a_2 和 a_3 。它们被选定于平行四次对称轴, 或者如果没有真正的四次对称轴, 则选定平行于二次对称轴。 x 、 y 和 z 轴形成平行于 a 、 b 和 c 轴的右手坐标系。

一个实例为溴化钠, 示于图11。

1.11. 对映形式的轴

在下述压电晶类中, 可能是右旋和左旋两种形式: 三斜1, 单斜2, 斜方222, 四方4和422, 三方3和32, 六方6和622, 及立方晶系的23晶类。

①对右旋石英来说, x 和 y 轴都与1945年的规定相反。对左旋石英, y 轴相反, 而 z 轴没有变化。

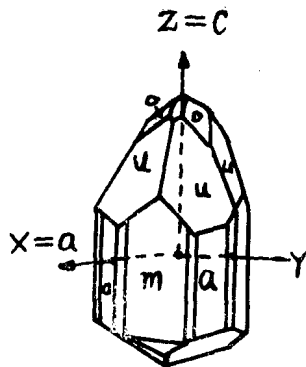


图9 电气石, 三方晶系, 晶类3m
Z轴位于对称面, 沿Y轴伸张, +Y端成为正电荷, 沿Z轴伸张, +Z端成为正电荷。

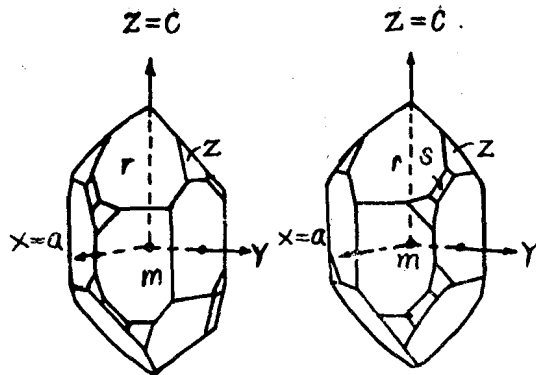


图10 左旋和右旋石英, 三方, 晶类32。

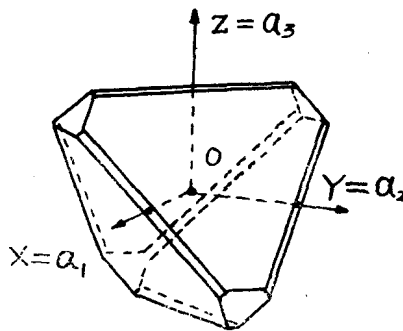


图11 溴酸钠、右旋晶体、立方晶系、晶类23。

如果右旋晶体以某一方向置于镜前, 从镜子里看到的映象将是相应的左旋晶体。如果右旋晶体具有右手直角坐标轴, 则左旋晶体的轴将显示出左手直角坐标轴。仅管如此, 标准的结晶学中对于所有晶体无论是右旋还是左旋, 实际上仍然采用右手直角坐标系。本压电晶体标准中也沿用这个习惯。在这个习惯下, 左旋形式可认为是右旋形式在结晶学上的倒转, 而不是它的镜象。②

对于左旋和右旋晶体, 所有弹性常数的符号都是相同的。然而, 左旋和右旋晶体的压电常数的符号, 则是相反的。

1.12 对石英晶体的特殊规则

现将上节所述的规则用于普通的32晶类的石英晶体 (α ——石英、即在温度低于 $\alpha-\beta$ 转变点 573°C 存在的形式)。

对于右旋和左旋石英晶体的轴, 现行规则已叙述在1.9节 (见图10)。这个轴的选定包含关于弹性常数 c_{14} 和 s_{14} , 以及压电常数 $d_{11}=-d_{12}=-d_{21}/2$, $e_{11}=-e_{12}=-e_{26}$, $d_{14}=-d_{25}$, 和 $e_{14}=-e_{25}$ 的某些规则。

弹性常数: 在这个规则之下, 右旋和左旋石英晶体二者, c_{14} 是负的, s_{14} 是正的。③

②任何实象的倒转, 是从其每一点画一条通过任意点 p 的直线, 并过 p 点延长该线至等距离来得到。倒转等效为绕过 p 点的任意轴作 180° 的旋转后, 继而在位于 p 点垂直该轴的镜中的反映。

③石英弹性常数对于对称轴的方程式, 例如, 象参考文献^[1]中方程式 (50) — (54) 保持未变, 这是由于经过从老的轴系到现行轴系某个方向余弦符号倒转的缘故。

由众所周知的基本方程式〔第三部份的(11)和(12)式〕可以证实,石英晶体的压电常数必须有与下列现在的轴系相一致的代数符号:

右旋石英: d_{11} 负, e_{11} 负,

d_{14} 负, e_{14} 正。

左旋石英: d_{11} 正, e_{11} 正,

d_{14} 正, e_{14} 负。

出现在第3部份(13)至(16)式中的压电常数 g 和 h 对石英晶体而言是特殊的,它们变为 g_{11} , g_{14} , h_{11} , h_{14} , 分别与Voigt的 d_{11} , d_{14} , e_{11} , 和 e_{14} 相对应。在所有情况下,它们的符号都分别与 d_{11} , d_{14} , e_{11} , e_{14} 的符号相同。

1.13. 按照现行推荐的确定石英晶轴及其方向的规则提要

- (A) $+x$ 轴将与结晶学的 $+a$ 轴重合, z 轴与结晶学的 c 轴重合, 如图10所示。
- (B) 对于伸张, a 轴的正端, 也就是 x 轴的正端, 右旋石英变为负电荷, 左旋石英则是正电荷。
- (C) 右旋石英, 对观察者来说, 当偏振器顺时针方向转动时, 锥光偏光仪干涉环散开。

1.14 压电晶体轴的选定

根据表I选定晶体的轴。表列晶类完全采用Hermann—Mauguin符号(即国际符号——译者注)标明, 两个定轴方法, 一是结晶学轴, 一是物理学和工程技术上的直角坐标轴。表中 a 、 b 、 c 是结晶学轴, (1.3至1.10和1.13节) a_0 、 b_0 、 c_0 系指沿这些轴的晶胞的尺寸。 x 、 y 、 z 是直角坐标轴, 无论是左旋还是右旋晶体, 通常都是形成右手坐标系、(1.9节和1.11至1.13节)。 α 、 β 、 γ 是各对结晶学轴之间的夹角(1.3节)。给出了熊夫利(Schoenflies)和Hermann—Mauguin两种符号, 后者往往是优先采用的。

表I 的说明:

在“Hermann—Mauguin符号”栏, 写在该栏左面的晶类是具有压电性的。

在“轴”栏下, 数字2, 3, 4, 6意思是二、三、四和六次对称轴; $\overline{4}$ (读为4横线)意为四次象转轴, $\overline{6}$ 为六次象转轴(即反轴——译者注); m 为平行于轴的对称面(即镜面——译者注); $\overline{m}$ 为垂直于轴的对称面。

a 、 b 、 c 是结晶学轴, x 、 y 、 z 为直角坐标轴, 在某些晶系, 这些轴中的二个或全部轴实际上不可能区分, 可以说是等效的, 常常重复相同的符号来表示这几个等轴, 并分别注以不同的足标, 如 a_1 、 a_2 、 a_3 。

a_0 、 b_0 、 c_0 分别是平行于 a 、 b 、 c 轴之晶胞的边长。 α 、 β 、 γ 分别是 c 与 b 、 a 与 c 、 b 与 a 之间的夹角。

确定任何晶体的 a 、 b 、 c 轴的方法, 包括满足一系列规则。列在每个晶系的名称下的第一条规定, 给出了鉴别轴的一般规则; 即用几个单位距离的相对数值和结晶学轴间的夹角来表示。以斜方晶系的222和 $2/m\ 2/m\ 2/m$ 晶类和三斜晶系而言, 这一惯例(1.3节)明白地描述了所有晶轴和它的方向。对单斜晶系, 将附加其他的规则, 就是 b 轴, 依据“轴”

表 1

晶 系	Hermann-Mauguin 符 号	轴						+/- 轴	熊 夫 利 (Schoorflies) 符 号	实 例
		结 晶 学 轴			矩 形 轴					
		c	a	b	x	y	z			
三 斜 $c_0 < a_0 < b_0$ α 和 $\beta > 90^\circ$	1 $\bar{1}$					$\perp(010)$ $\perp(010)$	c		C_1 S_2	AET $^{\Delta}$ 硫酸铜 (五水)
单 斜 $c_0 < a_0 < b_0$ $\beta > 90^\circ$; $\alpha = \gamma = 90^\circ$	m 2 2/m			/m 2 2	$\perp(100)$ $\perp(100)$ $\perp(100)$	b b b	c c c	x或z	$C_{1h} = C_s$ C_2 C_{2h}	斜 晶 石 EDT 石 膏
斜 方 $c_0 < a_0 < b_0$ (对 222 和 2/m 2/m 2/m, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)	222 2mm 2/m 2/m 2/m	2 2 2	2 /m 2	2 /m 2	a a a	b b b	c c c		$V = D_2$ C_{2v} $V_h = D_{2h}$	罗谢尔盐 (除居里 点之间外) 异 极 矿 重 晶 石
四 方 $a_0 = b_0$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\frac{4mm}{4}$ $\frac{2m}{4}$ 422 $\frac{4}{4}$ 4/m 2/m 2/m $\frac{4}{4}$ 4/m	$\frac{4}{4}$ $\frac{4}{4}$ 4 4 $\frac{4}{4}$ 4	/m 2 2 2 + + +	/m 2 2 2	(a_1) (a_1) (a_1) (a_1) (a_1) (a_1)	(a_2) (a_2) (a_2) (a_2) (a_2) (a_2)	c c c c c c	z z * * z z	C_{4v} $V_d = D_{2d}$ D_4 D_{4h} C_4 S_4 C_{4h}	氯化银—水化物, 磷酸二氢铵 (ADP) 硫酸镍 (六水) 锆 石 酒石酸锶钡 $Ca_2Al_2SiO_7$ 白钨矿

续前

晶系	Hermann-Mauguin 符 号	轴						+/- 轴	焦夫利 (Schoorflies) 符 号	实 例
		结 晶 学 轴			矩 形 轴					
		c	a	b	x	y	z			
立 方 $a_0=b_0=c_0$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	$2\ 3$	$2\ \frac{3}{4}$	2	$\frac{3}{4}$	(a_1)	(a_2)	a_3	z	T	氯酸钠
	$\frac{4}{3}\ 3\ m$	4	4	4	(a_1)	(a_2)	a_3	z	T_d	闪锌矿
	$4\ 3\ 2$	2	2	2	(a_1)	(a_2)	a_3	*	O	不知道
	$\frac{2}{m}\ 3\ \frac{2}{m}$	2	2	2	(a_1)	(a_2)	a_3	*	T_h	黄铁矿
	$4/m\ 3\ 2/\bar{m}$	4	4	4	(a_1)	(a_2)	a_3	*	O_h	氯化钠
三 方 $(a_0)_1=(a_0)_2=(a_0)_3$	3	$\frac{3}{3}$	+	a_3	a_1		c	任何两个	C_3	高碘酸钠 (三水)
	$3\ m$	3	+		a_1		c	"	$C_3=S_6$	白云石
	$3\ 2$	3	/m	/m	a_1		c	y, z	C_{3v}	电气石
		3	2	2	a_1		c	x	D_3	α -石英
	$3\ 2/m$	3	2	2	a_1		c	x	D_{3d}	方解石
六 方 $(a_0)_1=(a_0)_2$ $b=(a_0)_3$	$\frac{6}{6}$	$\frac{6}{6}$	+		a_1		c	x, y	C_{2h}	不知道
	$\frac{6}{6}\ m\ 2$	6	2	2	a_1		c	x	D_{3h}	蓝锥石
	6	6	+				c	z	C_6	霞石矿
	$6\ mm$	6	/m	/m	a_1		c	z	C_{6v}	纤维锌矿
	$6\ 2\ 2$	6	2	2	a_1		c		D_6	β -石英
		6			a_1		c		C_{5h}	磷灰石
	$6/m\ 2/m\ 2/m$	6	2	2	a_1		c		C_{6h}	绿柱石

△ Aminoethanolamine hydrogen d-tertrate(AET)——右旋酒石酸氢氨基乙醇胺

下第三行的对称性来确定。对其余的晶系， c 轴是首先确定的，且经常是高对称性的轴。符号 $\uparrow$ 出现的地方，除选定 c 轴以外，没有特殊的规则，此外，其余的轴，应以这样的方法选择即给出最小晶胞与 c 轴的规范相一致。

在六和七行，（四方和立方晶系） a_1 和 a_2 的括弧是表示垂直于 c （ z ）轴的两个结晶轴， x 和 y 轴是任意的标志。除 $\overline{4}2m$ 晶类外，每个方向的选定由 z 轴得到， x 轴定向后，这种选择并不影响常数的符号，唯一的限制为轴系必须是右手坐标系。在三个四方晶类（ 422 ， $4/m2/m2/m$ 和 $4/m$ ）和三个立方晶类（ 432 ， $2/m\overline{3}$ 和 $4/m\overline{3}2/m$ ）这种选定对符号的方向是无关紧要的，因此对弹性，介电和压电常数的数值大小和矩阵位置都是决无影响的。这六个晶类在第九栏以*号注明。

标题“+/-轴”这一栏表示的是确定轴系特别是对某些轴的方向没有特殊规则的晶类。出现在该栏的单个轴的符号表明该轴的方向留待该领域的第一个研究工作者选定，而且压电常数的某些符号将依赖于这种选定。见1.16节选定轴的指南。在这栏中的两个字母表示由同样的选定方法指定这两个轴，一般来说，第一个选定影响某些压电常数的符号，而第二个选定则影响另一些压电常数的符号。在两种命名情形中，也许还有某些压电常数的符号是不受这种选定的影响的。最后，象在晶类3表示的那样，仍然要选定任何两轴的方向，而该选定影响着压电常数的符号。

1.15. Hermann——Mauguin符号^[2]

在这个符号系统中，一个对称轴是用1、2、3、4、6数字之一来表示。数字表示绕该轴旋转一周互易的次数，即使晶体进入其内部结构性质的等同位置的次数。数字1表示全无对称性，因为有些结构必须完整地旋转一周后才能重合，2表示是二次对称轴。 $\overline{1}$ 、 $\overline{2}$ 、 $\overline{3}$ 、 $\overline{4}$ 、 $\overline{6}$ 表示象转轴， $\overline{1}$ 意思是简单的倒反中心； $\overline{2}$ 等效于对称面，因为对称面是十分重要的结构特性，用这样一个对称面符号 m 来代替 $\overline{2}$ 。如果有一对称面垂直于对称轴，这里为一个分式符号，以描述轴的对称性的数字与记号/ m 表示之。

任何晶类对称性的名称，配备有一、二、三个符号、每个表示一个对称要素。第一个符号通常指晶体的主轴，若只有一个主轴表示那个轴的对称形式，假使有什么不同，就是存在垂直于那个轴的对称面。第二个符号指的是晶体的次要轴，若其存在给出相似的对称特性符号，并包括有关垂直于该轴的对称面。若没有次要轴就只指对称面。立方晶系的次要轴是倾向于主轴的三次对称轴。第三个符号称做第三轴，如果存在的话，例如在六方晶系中平行于 $(11\overline{2}0)$ ，或者在四方晶系中平行于 (110) 或者平行于相应面。

1.16. 定轴正方向指南

作为代替其他的导向要点，下面提出建立压电晶体轴系的导向定则。轴向（不仅选定 z 轴而且选定 x 和 y 轴，如果需要这样做的话）将下列不为零的常数中的第一个定为正号： d_{33} ， d_{22} ， d_{36} ， d_{31} 。确定方向常数群的挑选有点是任意的，着重给出结晶学主要的 z 轴、规定沿该轴范围伸张应变的压电常数为正符号。如果用第一条定则不足以单独确定所有轴的方向，那么该定则再应用于第二个不为零的常数、必要时、再用第三个。对于具有对映结构的晶体，定则将适用于右旋晶体，而对左旋晶体，对于每个压电常数“正号”则读为“负号”。左旋晶体的轴向相对于右旋晶体，所有的压电常数的符号都是相反的。

该定则用于七大晶系的结果、总括如下：

- (1) 在 $m, 2mm, 4mm, 4, 3, 3m, 6, 6mm$ 晶类中, 正 d_{33} 确定 z 轴的方向。
- (2) 在 $3, 32, \bar{6}, \bar{6}m2$ 晶类中, 正 d_{11} 确定 x 轴方向。
- (3) 在 $3m, \bar{6}$ 晶类, 正 d_{22} 确定 y 轴方向。
- (4) 在 $\bar{4}2m$ 晶类中, 正 d_{36} 确定 x 与 y 轴间的区别。
- (5) 在 $23, \bar{4}3m$ 晶类、三个结晶轴中任意一个被选作 z 轴后, 正 $d_{14}=d_{36}$ 确定 x 轴和 y 轴间的区别。
- (6) 在 $\bar{4}$ 晶类, 正 d_{31} 确定 z 轴方向。
- (7) 在 $222, 422, 622$ 晶类, 所有轴的方向都是无关紧要的和可以反转的, 就只保持右手坐标系达到不影响压电常数符号的程度。
- (8) 在晶类 2 , x 和 z 轴的方向是无关紧要的, 且反转如象保持右手坐标系将不影响压电常数符号。
- (9) 在 $\bar{4}2m, 23, \bar{4}3m, 2mm, 4mm, 4, 6, 6mm$ 晶类中, x 和 y 轴的方向是无关紧要的。
- (10) 在 $32, \bar{6}m2$ 晶类中, y 轴的方向是无关紧要的。

2. 晶片定向标准

2.1 所有晶片定向的规范由一组“旋转符号”决定。这组符号用字母和角度来表示晶片取向的方式。假定是直角坐标轴, 可以用绕晶片边棱连续旋转的六个原始方位之一得到。

原始方位是指厚度、长度和宽度沿 x, y 和 z 轴, 但并不是每个都要求这样。不同晶系的 x, y 和 z 轴, 在第 1 部分已规定。

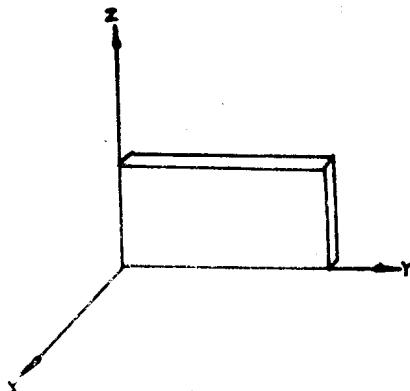


图12 (xy)切割

A. 该符号的头两个字母用来表示原始方位。

(a) 第 1 个字母 x, y 或 z 表示在任何旋转之前晶片厚度的方向。

(b) 第 2 个字母 x, y 或 z 表示在任何旋转之前晶片长度的方向。