

内 容 提 要

本书共八章。前四章主要叙述压电效应的物理意义，对有极性压电晶体和无极性压电晶体产生压电效应的原理作了较详细的物理解释。后四章主要叙述压电效应在水声、超声、电声、雷达、电视、通讯、导航、计算技术和计测等领域中的应用原理。

本书内容精炼，语言通俗易懂，可供有中学文化水平的工人、干部和有关科技人员阅读。

压电效应及其应用

宋道仁 肖鸣山 编

责任编辑：陈金凤

封面设计：王序德

*

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂 印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：6.5 字数：135 千字

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数：1—3200册 定价：1.15元

统一书号：13051·1513 本社书号：1352

前 言

压电效应自 1880 年被人们发现后,至今已经整整一百周年了。在这一个世纪里,压电效应作为一个重要的物理效应能够在实际中得到广泛的应用,是与现代科学技术的发展分不开的,特别是与近代电子技术的飞跃发展分不开的。目前它在水声、超声、雷达、电视、通讯、电声、导航及计测等多个领域中,都占有很重要的地位。因此,一直受到人们的重视。

我国自五十年代以来,在有关科研单位和高等院校就开展了对压电效应及其应用的系统研究,随后一个以制造压电器件为主的新兴的工业部门在电子学领域中以崭新的面貌兴盛起来。目前,在科研、国防及工农业等部门,对压电器件的应用也日益扩大。为了能通俗地了解压电效应及其应用的物理原理,进而更好地开展对它们的应用,促进我国四个现代化的发展,我们编写了《压电效应及其应用》这本普及性的科学读物。本书内容和文字均力求广泛多样,通俗易懂,可供具有中学以上文化程度的工人、干部和有关科技人员参考。

由于我们的水平有限,书中难免会存在某些缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编 者

1980 年 3 月于山东大学

目 录

第一章 压电效应与压电晶体	1
第一节 压电效应	1
一、正压电效应	1
二、逆压电效应	2
三、电致伸缩效应	2
第二节 压电晶体的结构	3
一、压电晶体的外形和内部结构	3
二、空间点阵和压电晶体	5
三、晶棱与晶向,晶面与晶面指数	7
四、晶体的对称元素与点群	9
第三节 压电晶体的介电性质	12
一、极化强度	12
二、介电关系	14
三、介电常数与压电晶体的对称性	15
第四节 压电晶体的弹性	16
一、应力	16
二、应变和应变与位移之间的关系	20
三、弹性关系(虎克定律)	23
四、压电晶体的对称性与弹性常数	24
第二章 有极性压电晶体的压电效应	27
第一节 钛酸钡晶体的内部结构	27
第二节 压电陶瓷的内部结构	32
一、压电陶瓷是多晶体	32
二、压电陶瓷的内部结构	33

三、压电陶瓷的自发极化	34
第三节 铁电体的压电效应	35
一、钙钛矿型压电晶体的电畴和铁电性	35
二、压电陶瓷的极化工序	38
三、铁电体的压电效应	38
第四节 压电陶瓷的压电效应表示式	40
一、压电陶瓷的正压电效应表示式	41
二、压电陶瓷的逆压电效应表示式	46
第三章 无极性压电晶体的压电效应	47
第一节 石英晶体的压电效应	47
一、石英晶体的理想外形	47
二、石英晶体的内部结构	48
三、石英晶体的对称性和晶轴	50
四、石英晶体的直角坐标轴	51
第二节 石英晶体的切割	51
一、石英晶体的切型符号	52
二、常用石英切片的特征	54
第三节 石英晶体的压电效应表示式	56
一、石英晶体的正压电效应表示式	56
二、石英晶体的逆压电效应表示式	60
第四章 压电效应的物理图象和量度	62
第一节 压电效应的一维物理图象	62
第二节 压电方程和压电常数	66
一、第一类压电方程	67
二、压电常数 d	69
三、其他类型的压电方程	70
第三节 压电效应的量度	71
一、压电常数的物理意义	72
二、机电耦合系数 K	73

第五章 压电换能器(一)	76
第一节 压电水声换能器	76
一、声纳的类型.....	78
二、几种压电水声换能器振子.....	78
三、几种压电水声换能器.....	80
四、水声换能器用的压电陶瓷.....	86
第二节 弯曲型压电换能器	89
一、弯曲型压电换能器的工作原理和支撑方式.....	89
二、低于谐振时的弯曲型压电换能器的特征.....	91
三、谐振时的弯曲型压电换能器特性.....	94
四、弯曲型压电换能器的应用.....	95
第三节 压电可听声和超声空气换能器	99
一、压电超声空气换能器结构和特性.....	100
二、压电超声空气换能器的应用.....	103
三、送话器用的压电声频空气换能器.....	104
四、压电蜂鸣器.....	107
第六章 压电换能器(二)	110
第一节 压电高压发生器	110
一、工作原理.....	110
二、加压方式.....	111
三、压电点火元件用的压电陶瓷.....	113
四、放电能量.....	114
五、压电点火元件的结构.....	116
第二节 压电功率超声换能器	118
一、压电功率超声换能器.....	118
二、压电功率超声换能器的应用举例.....	121
第三节 固体检测用的压电换能器	124
一、超声探伤.....	124
二、声速测井.....	126
第七章 压电振子及其应用	131

第一节 压电振子.....	131
一、压电振子的谐振特性	131
二、压电振子的等效电路	133
三、压电振子的测量	138
第二节 压电滤波器.....	139
一、单片压电振子的滤波作用	140
二、两片压电振子组合后的滤波作用	141
三、压电滤波器的电路结构	143
四、压电振子的常用振动模式	144
第三节 石英电子手表.....	150
一、石英电子手表的基本结构	151
二、电子手表用的压电石英振子	153
三、石英电子手表的其他部分简介	155
第四节 压电陶瓷变压器.....	157
一、压电陶瓷变压器的结构与工作原理	157
二、压电陶瓷变压器的工作特性	161
三、压电陶瓷变压器的应用	164
第八章 压电效应的其他应用.....	172
第一节 压电效应在延迟线中的应用.....	172
一、声体波延迟线	173
二、声表面波延迟线	178
第二节 压电效应在计测方面的应用.....	181
一、压电加速度计	181
二、压电陀螺	185
三、压电位移发生器	188
四、压电压力计	189
五、压电流量计	189
第三节 压电效应在医学上的应用.....	191
一、超声波治疗机	191
二、超声雾化	193

三、电子血压计	194
四、超声全息装置	195
附录 一些压电晶体的常数	197
一、一些压电晶体的相对介电常数 (ϵ/ϵ_0)	197
二、一些压电晶体的弹性柔顺常数 (s^E)	198
三、一些压电晶体的弹性刚度常数 (c^E)	199
四、一些压电晶体的压电常数 (d)	200

第一章 压电效应与压电晶体

第一节 压电效应

一、正压电效应

早在 1880 年,法国的两位科学家——居里兄弟,在研究石英晶体的物理性质时,发现了一种特殊的现象,这就是若按某种方位从石英晶体上切割下一块薄片,在其表面敷上电极,当沿着晶片的某些方向施加作用力而使晶片产生形变后,会在两个电极表面上出现等量的正、负电荷。电荷的面密度与施加的作用力的大小成正比;当作用力撤除后,电荷也就消失了。这种由于机械力的作用而使石英晶体表面出现电荷的现象,称为正压电效应,如图 1-1 所示。后来,人们又在其他一些晶体上进行了类似的实验,发现有许多晶体与石英晶体一样也具有这种现象。这些具有压电效应的晶体统称为压电晶体。

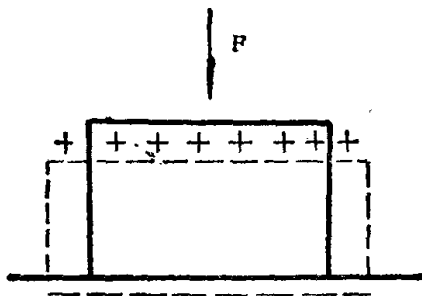


图 1-1 正压电效应示意图

(实线代表晶片形变前的情况,虚线代表晶片形变后的情况。)

8810039

• 1 •

二、逆压电效应

发现正压电效应的第二年,也就是 1881 年,由李普曼在理论上预言,由居里兄弟在实验上证实了另一种物理现象:如果将一块压电晶体置于外电场中,由于电场的作用,会使压电晶体发生形变,而形变的大小与外电场的大小成正比,当电场撤除后,形变也消失了.这种由于电场的作用而使压电晶体产生形变的现象,称为逆压电效应,如图 1-2 所示.实验证明,凡具有正压电效应的晶体,也一定具有逆压电效应,二者一一对应.

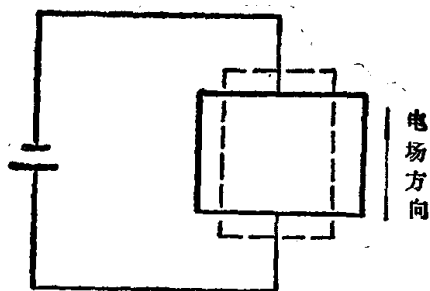


图 1-2 逆压电效应示意图

(实线代表晶片形变前的情况,虚线代表晶片形变后的情况.)

三、电致伸缩效应

压电晶体在外电场的作用下,会使晶体发生形变的现象,称为逆压电效应.其实,任何介质在电场中,由于诱导极化的作用,都会引起介质的形变.这种形变与逆压电效应所产生的形变是有区别的.

大家知道,在讨论电介质的形变时,主要从两个方面考虑:一方面电介质可能受外力作用而引起弹性形变;另一方面电介质可能受外电场的极化作用而产生形变.由实验可

知,由于诱导极化作用而产生的形变与外电场的平方成正比,这就是所谓电致伸缩效应。它所产生的形变与外电场的方向无关。可是,逆压电效应所产生的形变与外电场成正比关系,而且当电场反向时,形变也发生变化(如原来伸长可变为缩短,或者原来缩短可变为伸长)。

此外,电致伸缩效应在所有的电介质中都具有,不论是非压电晶体还是压电晶体;而逆压电效应只有在压电晶体中才具有。压电晶体常在小信号下应用,与压电效应相比,一般状况下,可以把很弱的电致伸缩效应忽略。然而,对于一些高介电性的压电材料,则需要加以考虑。

第二节 压电晶体的结构

一、压电晶体的外形和内部结构

压电晶体有天然的,也有人工培育的。压电晶体具有一般晶体的特点,即它的外形是由一定规则的多面体所构成。围成多面体的面称为晶面;晶面间的交线称为晶棱。图 1-3 表示压电石英晶体的一些外形。实验发现,对同一种压电晶体相应晶面之间的夹角保持不变。这个普遍规律称为晶面角守恒定律。

压电晶体在外形上的规律性,反映了内部结构的规律性。用 X 射线研究的结果表明,证实了组成压电晶体的原子(或分子、离子)的重心在空间的排列是有规律地重复的。这种按照一定的方式不断重复排列的性质,称为晶体结构的周期性,这是晶体的结构特点之一,压电晶体亦不例外。组成非晶体的原子(或分子、离子)的重心在空间的排列是没有周期性的。图 1-4 表示了压电石英晶体与石英玻璃(非晶态)的结构示意图,图中“●”代表硅(Si)原子,“○”代表氧(O)原子。从图中

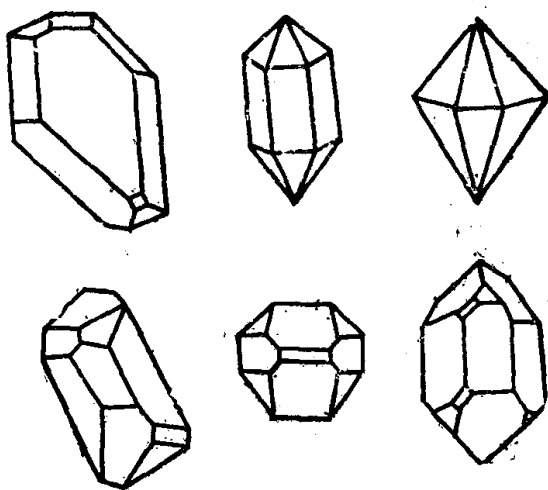


图 1-3 压电石英晶体的一些外形

看出,尽管组成它们的原子种类及数目相同,但它们的排列是各自不同的。压电石英晶体所排列的平面图形是许多小的正六边形,每个硅原子周围的结构都一样;而石英玻璃排列的平

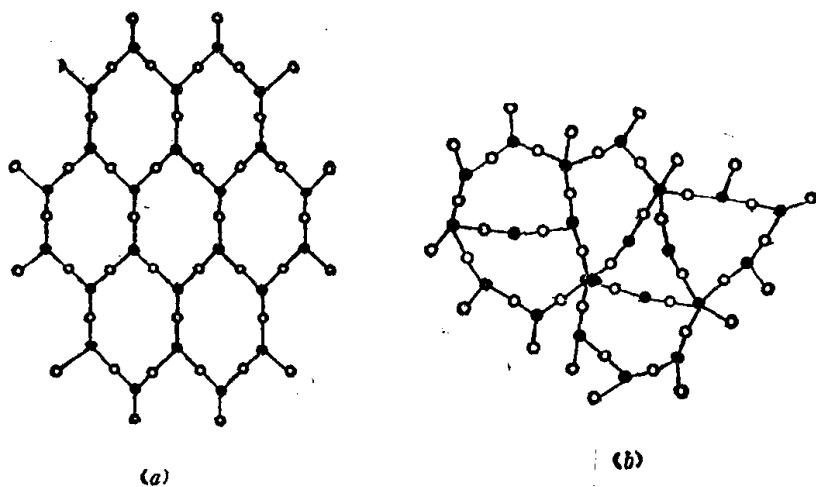


图 1-4 石英晶体和石英玻璃的结构示意图
(a) 压电石英晶体 (b) 石英玻璃

面图形则是许多不规则的多角形，每个硅原子周围的结构不一定相同。压电材料中有一类称为压电陶瓷的晶体，它是压电多晶体，组成它的每一个小晶粒内部的原子(或分子、离子)重心也是周期性地排列的。

二、空间点阵和压电晶体

为了描述晶体结构的周期性，引入空间点阵的概念，即用一系列的点在空间按一定规律排列而得到的几何图形。若将这些点用来代表晶体内的原子(或分子、离子)的重心，可用此来模拟压电晶体的内部结构。如图 1-5 所示，若用三组平行线把这些点连接起来，就构成一个空间网络，称为空间格子。从图中看出，整个空间格子就是由一个小六面体 $ABCD$ 不断重复排列的结果。若以 A 为原点，选 $\overrightarrow{AB} = \mathbf{a}$, $\overrightarrow{AC} = \mathbf{b}$, $\overrightarrow{AD} = \mathbf{c}$ ，则 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{c}$ 称为空间格子的基矢。

不论是空间点阵还是空间格子，都是一些几何概念，只有让点阵的点代表晶体的原子(或分子、离子)的重心后，空

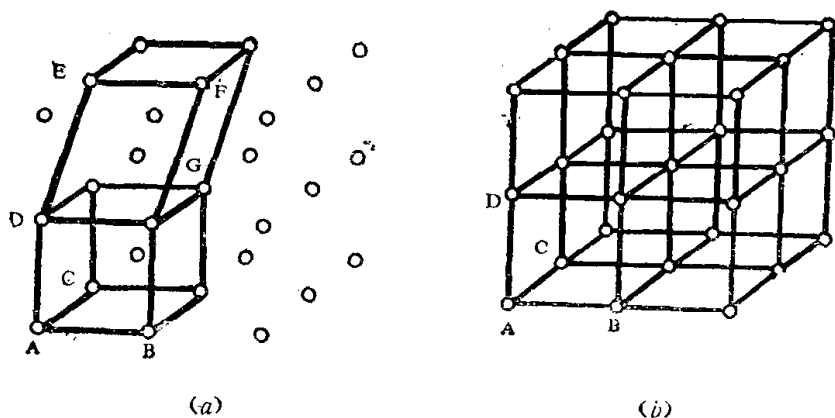


图 1-5 空间点阵与空间格子示意图

(a) 空间点阵 (b) 空间格子

间点阵与晶体之间才存在对应关系。 它们的对应关系见表 1-1。

表 1-1 空间点阵与晶体的对应关系

抽象的	空间点阵	点阵中点子 (或结点)	重复单元	基矢	平面点阵	直线点阵
具体的	晶体	原子或分子、离 子的重心	晶胞	晶格常数	晶面	晶棱

空间格子的重复单元(即平行六面体)可用三个边长 a 、 b 、 c 及它们之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示,如图 1-6 所示。根据不同的边长和夹角,重复单元可以划分为七个类型,称为七大晶系,如表 1-2 所示。空间格子的重复单元,相当于晶体中的晶胞。因为 a 、 b 、 c 和 α 、 β 、 γ 是确定晶胞形状和大小的参数(称为晶格参数),所以晶胞有七个类型。由于晶胞是晶体的

表 1-2 七大晶系

晶 系 名 称	晶轴上的周期	晶轴间的夹角
三斜晶系	$a \neq b \neq c$ $c < a < b$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
单斜晶系	$a \neq b \neq c$ $c < a$	$\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$ $\beta \geq 90^\circ$
正交晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
四方晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
六角晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
三角晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
立方晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

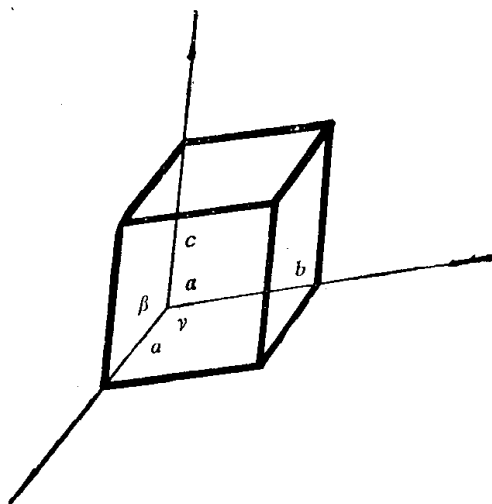


图 1-6 空间格子的重复单元

重复单元,它最能代表晶体的性质, a 、 b 、 c 的方向就是晶轴的方向, a 、 b 、 c 的大小就是晶轴上的周期,即晶格常数。

三、晶棱与晶向,晶面与晶面指数

由于晶格结构具有周期性,晶格中各格点周围情况又都是一样的,因此通过任何两个格点作直线,在此直线上所有格点的周期都相同。这样的直线称为晶棱。若再通过其他格点作许多与此晶棱平行的直线,这些平行直线组成一个晶棱族。晶棱的取向称为晶向。晶向如何表示呢?我们知道,空间任一直线可由下式表示

$$x = x_0 + lt$$

$$y = y_0 + mt$$

$$z = z_0 + nt$$

式中的 l 、 m 、 n 为直线的方向余弦。我们通常用 $[lmn]$ 来表示晶棱的方向,称为晶棱指数。一般 l 、 m 、 n 之间为互质整数比,这里的方括号是约定标志,不能随意更改。

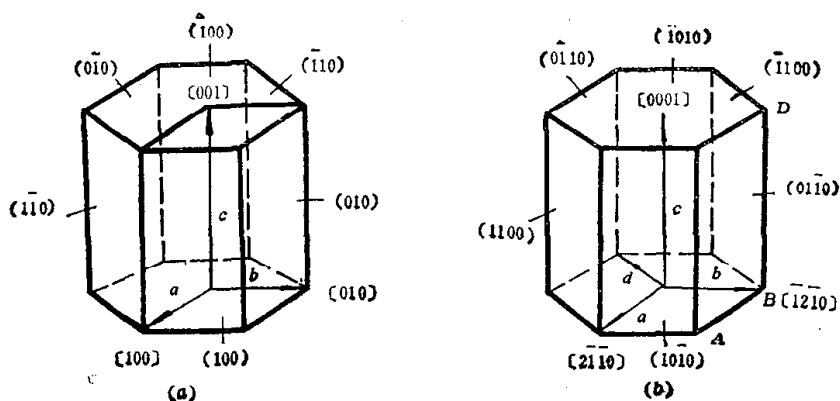


图 1-7 六角晶体的晶向和晶面指数

(a) 三个晶轴 (b) 四个晶轴

在晶格中,还可以从各个方向作无限多个平面族,即晶面族。一族晶面彼此距离相等,方向相同。如何表示这些晶面族的方向呢?我们知道,一个平面的方向是用这个平面在三个坐标轴上的截距来描述的,描写晶面方向的方法也是如此。因为一族晶面一定包含了所有的格点,所以截距的长度是一组有理数,或者说截距的倍数为晶格常数的整数倍。如果晶面与某一坐标轴平行,则晶面在此坐标轴上的截距就等于无穷大。为了避免使用无穷大,常采用截距倒数的互质整数比 $h:k:l$ 来表示晶面方向。通常不用比例记号,而用 (hkl) 来表示晶面方向。这里的圆括号也是约定标志,不能随意更改。 (hkl) 称为晶面指数。例如, (010) , 表示平行于 a 、 c 轴,垂直于 b 轴且截距为 1 的平面; (100) , 表示平行于 b 、 c 轴,垂直于 a 轴且截距为 1 的平面。这里应该注意它们与 $[010]$ 及 $[100]$ 记号的区别,后者只表示 b 轴及 a 轴的方向。

在三角晶系和六角晶系中,为了更好地反映晶体的对称性,给实践带来方便,往往采用四轴定向方法,晶向和晶面指数

都用四个指数.六角晶系的晶向和晶面指数如图 1-7 所示.四个晶轴为 a 、 b 、 c 、 d 、其中 a 、 b 、 d 轴在一个平面上互成 120° 的夹角, c 轴则垂直于此平面. 四轴晶面指数 ($hkil$) 为该晶面在四轴坐标上的截距倒数的互质整数比. 例如,晶面 ABD 与 a 轴和 c 轴平行, 在 b 轴上截距为 $1b$, 在 d 轴上截距为 $-1d$, 故得该平面的晶面指数为 $(01\bar{1}0)$. 从图中还看出, 各晶面指数之间存在这样的关系, 即 $h + k + i = 0$, 就是说, 在 h 、 k 、 i 中, 只要知道其中两个即可确定第三个.

四、晶体的对称元素与点群

晶体的对称性就是晶体相同部分有规律的重复. 晶体的对称性需要用对称元素来描述. 现将对称元素的意义叙述如下.

1. 对称中心

若假想一定点, 通过该定点作直线, 在定点两边可以找出对应的点, 则该定点称为对称中心. 对称中心的国际符号为 " $\bar{1}$ ".

2. 对称面

若假想一平面, 通过该平面可将图形分为互成镜象反映的两个相等部分, 则该平面称为对称面. 对称面的国际符号为 " m ".

3. 旋转轴(对称轴)

若假想一直线, 通过该直线旋转一角度后, 可使图形相同部分重复, 则该直线称为对称轴. 如果晶体绕旋转轴转 $360^\circ/n$ 后, 能够复原, 则称此晶体具有 n 次旋转轴, 或简称 n 次轴, 也有称为 n 次对称轴的. 由于晶格结构的周期性, 给晶体的旋转对称性带来了严格的限制, 即 n 只能取值 1、2、3、4、6. 各次轴的记号为

一次轴(旋转 0° 或 360°), 国际符号为 “1”

二次轴(旋转 180°), 国际符号为 “2”

三次轴(旋转 120°), 国际符号为 “3”

四次轴(旋转 90°), 国际符号为 “4”

六次轴(旋转 60°), 国际符号为 “6”

4. 倒反轴

假想一直线, 在此直线上有一定点, 如果绕此直线旋转一定角度后, 再继续对定点进行反演, 其结果可使图形的相同部分重复, 则该直线称为倒反轴. 显然, 倒反轴是一个复合对称元素, 其中既包括了对称中心, 又包括了旋转轴, 与旋转轴一样, 晶体也只能有 1、2、3、4、6 次旋转倒反轴. 倒反轴的国际符号为 $\bar{1}$ 、 $\bar{2}$ 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{4}$ 、 $\bar{6}$.

一次倒反轴就等于对称中心

二次倒反轴就等于对称面, 即 $\bar{2} = m$

三次倒反轴的效果与三次轴加上对称中心的效果一样, 即 $\bar{3} = 3 + \bar{1}$

六次倒反轴的效果与三次轴加上与该轴垂直的对称面的效果一样, 即 $\bar{6} = 3 + m$

四次倒反轴是一个独立的对称元素. 因此, 晶体的宏观对称性共有八种基本的对称元素, 即 $\bar{1}$ 、 m 、1、2、3、4、6 和 $\bar{4}$.

知道了晶体的八种基本的对称元素后, 就可以了解点群的概念了. 在数学上, 把对称元素的集合叫做“对称群”. 因为上述八种对称元素中, 在进行对称动作时, 总是有一点保持不动, 所以包括上述对称元素的集合又称为“点群”. 人们经过长期研究, 发现这八种对称元素共有三十二种组合方式, 即三十二种点群. 这三十二种点群对应于晶体的三十二种宏观对称类型, 就是说自然界千千万万种晶体, 可归纳为三十二种