

磷酸铝(α - AlPO_4)单晶旋光性的研究

徐 斌 刘希玲 韩建儒
(山东大学晶体材料研究所)

提 要

本文研究了磷酸铝单晶的旋光特性。用偏光显微镜观察了晶体的锥光干涉图、埃拉螺旋图;测量了晶体的旋光率、旋光率随波长和温度的变化。指出该晶体旋光性质是受晶体中 Al-O 及 P-O 四面体的旋向和随温度的变化所制约。

一、引 言

磷酸铝单晶(α - AlPO_4)与水晶(SiO_2)同属三方晶系, D_3-32 晶类。但由于它的机电耦合系数在体波和声表面波的应用中, 比水晶大 2~4 倍^[1], 在室温下又具有与温度无关的谐振频率的晶体方向, 所以在体波超声器件的应用方面, 可以降低插入损耗, 提高频率范围, 加大频宽, 增强温度的稳定性。较之水晶是一种更为适宜的压电晶体材料^[2~4]。

磷酸铝晶体的对称类型决定了该晶体是既有双折射, 又有旋光性的晶体。对双折射性质, 人们早已了解到该晶体是 $n_o=1.5243$, $n_e=1.5334$ ($\lambda=600 \text{ m}\mu$) 的正光性单轴晶^[5]。但对旋光性的报道尚未见到。本文研究了磷酸铝晶的旋光特性: 晶体的锥光图、晶体的埃拉螺旋图、旋光率、旋光率随波长和温度的变化等。

二、旋光现象的观察

1. 锥光干涉图

用缓慢升温法培育出的透明磷酸铝单晶^[6], 垂直光轴切下厚约 2 mm 薄片, 两面抛光后置于偏光显微镜的载物台上, 在聚敛光下可观察到晶体的锥光干涉图(见图 1), 它是个同心

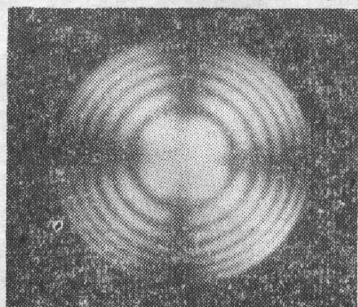
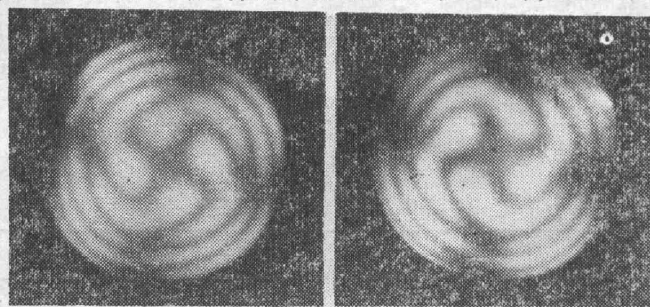


图 1 AlPO_4 晶体锥光干涉图

Fig. 1 Interference figure of conoscopically illuminated AlPO_4 crystal



(a) right-handed

(b) left-handed

图 2 AlPO_4 晶体埃拉图

Fig. 2 "Ela" figure of AlPO_4 crystals

的暗色和光亮的圆环。它们与暗色的宽十字正交。由于磷酸铝晶体的旋光性，十字带没有交到视场中心。中心的亮度完全决定于晶体的旋光率和晶片的沿光轴方向的厚度。

2. 埃拉螺旋图

a. 在锥光干涉图的基础上，再用一块同样厚度、旋向相反的磷酸铝晶片置于试样上，就可观察到特有的暗色四射线平面螺旋，形成由中心向外扩展的风车形螺旋干涉图。这就是埃拉图。如果螺旋顺时针旋向，是右旋晶体埃拉图 [见图 2(a)]，说明放在下面的晶片为右旋晶体。反之，螺旋逆时针旋向，是左旋晶体埃拉图 [见图 2(b)]，说明放在下面的晶片为左旋晶体。旋光相同的晶片叠合，不产生埃拉图，因为这种叠合相当于增加晶片的厚度，所产生的效果只会引起干涉环圈数的增加。

b. 将上述实验中一晶片换成 $\lambda/4$ 云母片，彼此相叠合，可以获得双射线螺旋，看到八卦形的埃拉螺旋图。如果 $\lambda/4$ 片以对角线位置放在右旋磷酸铝晶片的上面，埃拉螺旋弯向右 [见图 3(a)]，如果 $\lambda/4$ 片下面放的是左旋磷酸铝晶体，则获得左旋埃拉图 [见图 3(b)]。

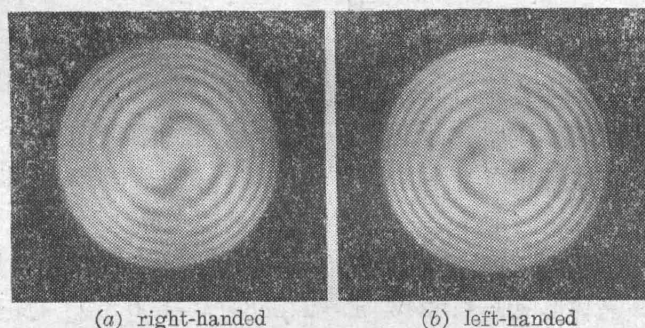


图 3 八卦形埃拉螺旋图

Fig. 3 One kind of the "Epa" figure

三、旋光率随波长和温度的变化

根据偏振光波振动面旋转角度 ϕ 和晶片沿光轴方向厚度 d ，可计算出光通过 1 mm 厚晶体振动面转动的角度，即 $\rho = \phi/d$ ，为旋光率。对不同波来说，旋光率是不同的。

1. 可见光范围内旋光率随波长的变化

实验中用 GW-SA 型单色仪来改变波长，偏光显微镜的检偏镜能在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内可调。所得结果列于表 1。根据表 1 绘制的曲线见图 4。可以看出，磷酸铝晶体的旋光率 ρ 随波长 λ 的增加而变小，几乎与 λ^2 成反比关系。

表 1 室温下 AlPO_4 旋光率与波长关系

Table 1 Relationship between gyration rate and wavelength at room temperature

ρ (度/毫米)	λ ($m\mu$)	ρ (度/毫米)	λ ($m\mu$)	ρ (度/毫米)	λ ($m\mu$)
9.0	644.5	16.5	539.4	25.0	480.8
10.0	604.5	17.5	527.8	25.5	473.1
12.5	588.2	18.5	517.0	27.5	465.8
13.5	564.5	20.5	507.0	30.0	458.9
14.0	551.9	23.0	489.0	33.5	452.4

2. 旋光率随温度的变化

以单色钠光灯为光源, 样品置于偏光显微镜的载物台上的加热台里, 加热台由 DWT-702 单机控温。实验装置见图 5, 记录不同温度下的旋光角 ϕ , 换算成旋光率 ρ , 列于表 2。图 6 是根据表 2 绘制的曲线。不难看出, 在加热的情况下, 旋光率会增加。室温下每升高 1°C , 旋光率约增加 0.75%。在磷酸铝相变点 (584°C) 时, 旋光率突变, 超过相变点, 曲线变平。

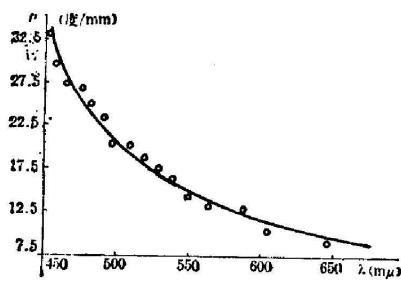


图 4 旋光率与波长关系曲线

Fig. 4 The curve of gyration rate versus wavelength

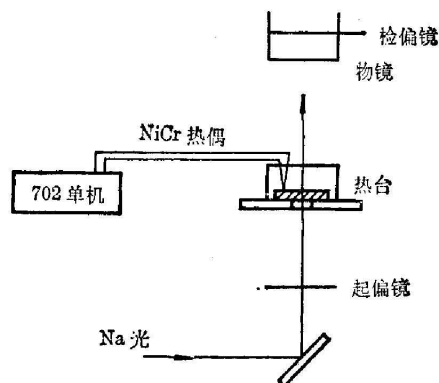


图 5 旋光率随温度变化实验装置

Fig. 5 Schematic illustration of gyration rate varied with temperature

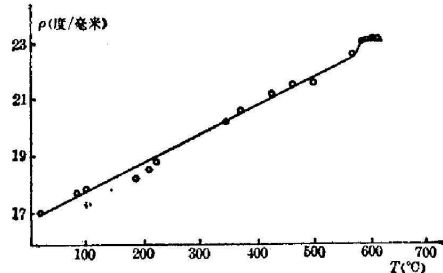


图 6 AlPO_4 晶体旋光率随温度变化曲线

Fig. 6 The curve of gyration rate versus temperature

表 2 AlPO_4 晶体旋光率与温度关系

Table 2 Relationship between gyration rate and temperature

ρ (度/毫米)	T ($^\circ\text{C}$)	ρ (度/毫米)	T ($^\circ\text{C}$)	ρ (度/毫米)	T ($^\circ\text{C}$)
17.0	21	20.0	346	23.0	584
17.5	87	20.5	374	23.0	594
17.7	102	21.0	426	23.0	600
18.0	180	21.3	460	23.0	610
18.5	205	21.5	500		
18.7	216	22.5	574		

四、讨 论

1. 旋光现象的本质

任何一束线偏振光波沿着不发生双折射的方向进入晶体时, 可以分解为两个频率相同、

方向相反的圆偏振光波, 见图 7。设右旋圆偏振光波 OA , 左旋圆偏振光波 OB 的波长和折射率分别为 $\lambda_r, \lambda_l, n_r, n_l$ 。在晶体中传播了 d 距离后, 两个光波的相位差为:

$$\Gamma = 2\pi d \cdot \left(\frac{1}{\lambda_l} - \frac{1}{\lambda_r} \right) = \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_l - n_r),$$

式中 λ_0 是真空中波长。所以线偏振光波振动面转角是: $\phi = \frac{\Gamma}{2} = \frac{\pi d}{\lambda_0} (n_l - n_r)$ 。旋光率为: $\rho = \frac{\phi}{d} = \frac{\pi}{\lambda_0} (n_l - n_r)$ 。对多数旋光晶体来说, $n_l - n_r$ 很小, 但由于 λ_0 和晶片厚度相比更小, 所以转角 ϕ 是可以测出来的。通过求解晶体双折射性质的基本方程: $D_j = n^2 [E_j - \mathbf{K}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{K})]$ ($j=1, 2, 3$) 和晶体的空间色散方程: $D_j = \varepsilon_{jkl} E_k + i(\mathbf{E} \times \mathbf{G})$, ($j, k=1, 2, 3$), 可以得到这两个不相等的折射率 n_r, n_l , 它们的差值为 $G/\bar{n}^{[7]}$ 。其中 G 为回转型量, \bar{n} 是光轴方向的折射率。对磷酸铝晶体而言, $\bar{n} = n_o = 1.5243$, 代入求得 $G = \rho \lambda_0 n_o / \pi = 6.5 \times 10^{-6}$; 对水晶 $G_{\text{水晶}} = 1.1 \times 10^{-4}$ 。 G 是衡量旋光性大小的参数, 因而磷酸铝晶体旋光率小于水晶。

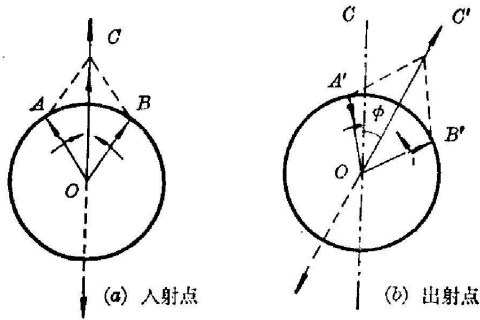


图 7 光沿不发生双折射方向通过晶体旋光现象
Fig. 7 Gyration phenomenon when light passes through crystal along the direction where no birefringence occurs

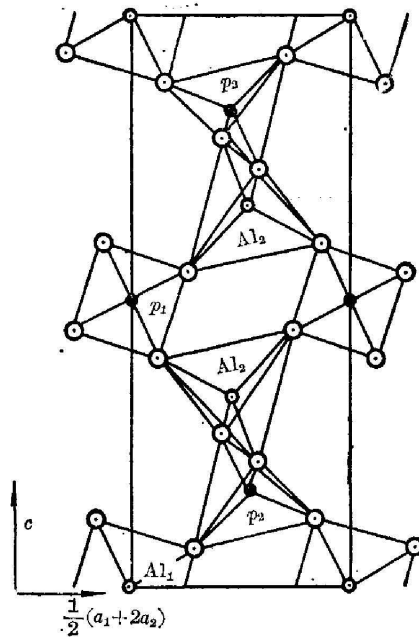


图 8 垂直 a_1 的平面结构投影图
Fig. 8 Structure projection on a plane perpendicular to a_1

2. 磷酸铝晶体旋光性与晶体结构关系

旋光性是由旋光物质内部构造所决定的。磷酸铝晶体对称性告诉我们, 在 z 轴 (光轴) 方向有唯一的三次对称轴。从空间群来看, 它是一个三次螺旋轴。对右旋晶体而言, 空间群为 $P_{3,21}$, 对左旋而言, 是 $P_{3,1}$ 。图 8 给出了右旋磷酸铝晶体垂直于 a_1 方向的平面投影^[8]。从图中不难看出, 每个单胞中有 3 个磷酸铝分子。P-O 四面体和 Al-O 四面体交替相连。为了弄清两类四面体在 z 方向螺旋上升的情况, 将此图的 $z = -\frac{1}{4} \sim \frac{1}{4}$ 和 $z = \frac{1}{4} \sim \frac{3}{4}$ 的两个截面图画在图 9 中, 记为图 9(b)、图 9(a)。

对 Al-O 四面体, 在图 9(a) 中, Al 的坐标为 $(x, 0, 1/3)$, z 方向高度为 $1/3$, 处在 $(0, x, 2/3)$ 位置的 Al, z 向高度为 $2/3$, 在图 9(b) 中, Al 的坐标为 $(\bar{x}, \bar{x}, 0)$, z 向高度

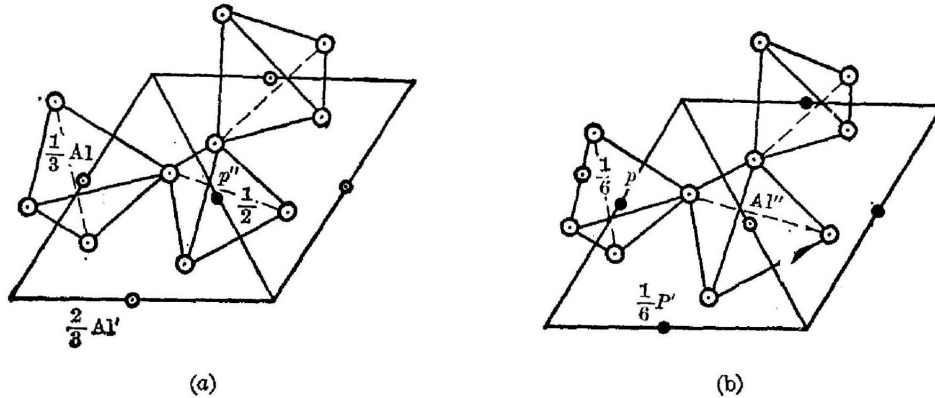


图 9

- (a) AlPO_4 的 $z \sim 1/4$ 到 $z \sim 3/4$ 结构截面图
 (b) AlPO_4 的 $z \sim -1/4$ 到 $z \sim 1/4$ 结构截面图

Fig. 9

- (a) Cross section of $z \sim 1/4$ to $z \sim 3/4$ structure of AlPO_4 crystal
 (b) Cross section of $z \sim -1/4$ to $z \sim 1/4$ structure of AlPO_4

为 0。[上述 $x = 0.4664 \pm 0.0002$] 可见 Al-O 四面体逆时针沿 z 向上升, z 轴为三次螺旋轴。对 P-O 四面体, 在图 9(b) 中, p 的坐标为 $(x, 0, -1/6)$, p' 的坐标为 $(0, x, 1/6)$, 上述 p 和 p' 的 z 向高度分别为 $-1/6, 1/6$, 相差 $1/3$; 在图 9(a) 中, p'' 的坐标为 $(\bar{x}, \bar{x}, 1/2)$ 。 p' 与 p'' z 向高度差为 $1/6 \times 2 = 1/3$ 。[上述 x 值为 0.4669 ± 0.0002]。可见 z 轴也是 P-O 四面体的三次螺旋轴, 其旋向也与 Al-O 四面体相同。这就说明在磷酸铝晶体结构中, P-O 和 Al-O 四面体所形成的共轭螺旋的旋向与三次螺旋轴的旋向相同。当温度升高时, 其四面体是不断改变方位的, 旋光率也随着增加。当温度升到 584°C 时, 四面体发生突变, 变为正四面体, 四面体的三个二次轴分别与 $a(x)$ 、 $b(y)$ 、 $c(z)$ 平行。晶体结构也由低温时的三方对称变成高温时的六方对称。旋光率曲线突变。超过相变点, 旋光率不再随温度变化而变化, 曲线变平。所以可以认为, 磷酸铝晶体旋光率与 Al-O 和 P-O 四面体及其晶胞结构方位有着密切关系。也就是说, 是受晶体中 P-O 和 Al-O 四面体的旋向及随温度变化的方位所制约的。这一点和水晶的旋光性受 Si-O 四面体的方位和旋向所制约基本是相同的^[9]。

五、结 论

磷酸铝晶体旋光现象、晶体的锥光干涉图、埃拉螺旋图、旋光率随波长和温度的变化等, 与水晶基本相同。所不同的是, 磷酸铝晶体的旋光率比水晶略小。室温下, 每升高 1°C , 磷酸铝晶体旋光率增加 0.75%。该晶体旋光性是受晶体中 P-O 和 Al-O 四面体的旋向及随温度的变化所制约的。

参加晶体生长实验的还有杨忠森同志。

参 考 文 献

- [1] B. M. O'Connell and P. H. Carr; *IEEE Trans. Sonics Ultrason*, 1977, **SU-24**, No. 6, 376.
- [2] 经和珍;《压电晶体技术》, 1983, No. 3, 7.
- [3] 徐斌等;《压电晶体技术》, 1984, No. 1 (Jan), 1.
- [4] E. J. Ozimek and B. H. T. Chai; *Proc of the 33th annual frequency Control Symposium*, (Atlantic City, 1979), 80.
- [5] W. L. Bond; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, No. 1 (Jan), 167.
- [6] 徐斌, 韩建儒等;《山东大学学报(自然科学版)》, 1982, No. 1, 77.
- [7] 蒋民华;《晶体物理》, (山东科技出版社, 1980), 305.
- [8] D. Schwarzenbach; *Z. Kristallagr.* 1966, **123**, No. 3/4, 161.
- [9] 仲维卓;《人工水晶》, (科学出版社, 1983), 303.

Investigation of optical gyration in α -AlPO₄ crystals

XU BIN LIU XILING AND HAN JIANRU

(Institute of Crystal Materials, Shandong University)

(Received 10 April 1984; revised 29 June 1984)

Abstract

This paper presents the investigation of optical gyration in α -AlPO₄ crystals. By polaroids, the gyration light interference pattern and "Эпа" helical pattern have been observed. The optical gyration rate and its variations with wavelength and temperature have been measured. It is pointed out that the optical gyration of this crystal is constrained by the rotation direction of Al-O and P-O tetrahedron and their variations with temperature.