

利用超声脉冲回波重合法测定铌酸锂 单晶弹性常数 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D

王汝菊 王积方 查 济 璇

(中国科学院物理研究所) (中国科学院声学研究所)

1984年6月29日收到

提 要

本文从基本的压电 Christoffel 方程出发导出三角晶系 $3m$ 点群压电晶体弹性常数的表示式, 并采用 10MHz 射频超声脉冲回波重合法测量了沿 LiNbO_3 不同对称方向传播的声速, 结合 e_{ij} 和 ϵ'_{ij} 给出了 LiNbO_3 全部弹性常数 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D . 它们是

$$\begin{aligned} C_{11}^E &= 19.89, & C_{12}^E &= 5.25, & C_{13}^E &= 7.81, & C_{14}^E &= 0.96, \\ C_{33}^E &= 25.44, & C_{44}^E &= 6.10, & C_{66}^E &= 7.32 \times 10^{10} \text{N/m}^2, \\ C_{11}^D &= 21.51, & C_{12}^D &= 3.65, & C_{13}^D &= 7.91, & C_{14}^D &= -1.41, \\ C_{33}^D &= 26.10, & C_{44}^D &= 9.62, & C_{66}^D &= 8.93 \times 10^{10} \text{N/m}^2. \end{aligned}$$

一、引 言

铌酸锂(LiNbO_3)属于三角晶系 $3m$ 点群, 它具有很强的压电性, 所以弹性常数中包含有来自压电的贡献. 用超声方法系统的测定 LiNbO_3 晶体弹性常数 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D 报道不多^[1-4], 而已报道的测量值较分散. 本文从基本的压电 Christoffel 方程出发, 导出三角晶系 $3m$ 点群晶体的全部 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D 表达式, 并用载波频率为 10MHz 的超声脉冲回波重合法测定了沿 LiNbO_3 单晶不同对称方向传播的声速, 结合压电应力常数 e_{ij} 和介电常数 ϵ'_{ij} 的报道值, 给出了 LiNbO_3 全部独立的弹性常数 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D .

二、压电 Christoffel 方程的准静态近似解

根据压电本构关系, 从声场方程和麦克斯韦场方程的线性压电耦合理论出发得到准静态近似的压电增劲 Christoffel 方程^[3]

$$k^2 \left\{ l_{iK} \left[C_{KL}^E + \frac{[e_{Kj}l_j][l_ie_{iL}]}{l_i\epsilon'_{ij}l_j} \right] l_{Li} \right\} v_i = \rho\omega^2 v_i, \quad (1)$$

其中

$$C_{KL}^E + \frac{[e_{Kj}l_j][l_ie_{iL}]}{l_i\epsilon'_{ij}l_j} = C_{KL}^D \quad (2)$$

为压电增劲弹性常数。式中 $\mathbf{l} = l_x \mathbf{x} + l_y \mathbf{y} + l_z \mathbf{z}$ 为传播方向的单位矢量。算符 l_{iK} 和 l_{Li} 分别为

$$l_{iK} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 & 0 & l_z & l_y \\ 0 & l_y & 0 & l_z & 0 & l_x \\ 0 & 0 & l_z & l_y & l_x & 0 \end{bmatrix},$$

$$l_{Li} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 \\ 0 & l_y & 0 \\ 0 & 0 & l_z \\ 0 & l_z & l_y \\ l_z & 0 & l_x \\ l_y & l_x & 0 \end{bmatrix}.$$

已知三角晶系 $3m$ 点群的弹性常数、压电应力常数及介电常数矩阵分别为

$$[C_{ij}^E] = \begin{bmatrix} C_{11}^E & C_{12}^E & C_{13}^E & C_{14}^E & 0 & 0 \\ C_{12}^E & C_{11}^E & C_{13}^E & -C_{14}^E & 0 & 0 \\ C_{13}^E & C_{13}^E & C_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ C_{14}^E & -C_{14}^E & 0 & C_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^E & C_{14}^E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14}^E & C_{66}^E \end{bmatrix},$$

$$[e_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{x5} & -e_{y2} \\ -e_{y2} & e_{y2} & 0 & e_{x5} & 0 & 0 \\ e_{z1} & e_{z1} & e_{z3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\epsilon_{ij}^s] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^s & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx}^s & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz}^s \end{bmatrix}. \quad (3)$$

我们选坐标轴 x, z 分别与晶轴 a_1, c 相重合, y 轴垂直于 a_1, c 轴。属于三角晶系 $3m$ 点群的 LiNbO_3 晶体, C_{ij}^E 的表达式可按以下步骤导出:

1) 超声波沿 x 轴传播

$$\mathbf{l} = \mathbf{x}, \quad l_x = 1, \quad l_y = l_z = 0.$$

这时准静态近似的压电增劲 Christoffel 方程 (1) 为

$$k^2 \begin{bmatrix} C_{11}^E & 0 & 0 \\ 0 & C_{66}^E + (e_{y2}^2/\epsilon_{xx}^s) & C_{14}^E - (e_{x5}e_{y2}/\epsilon_{xx}^s) \\ 0 & C_{14}^E - (e_{x5}e_{y2}/\epsilon_{xx}^s) & C_{44}^E + (e_{x5}^2/\epsilon_{xx}^s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \rho\omega^2 \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}.$$

它的第一个解是色散关系

$$\rho\omega^2 = k^2 C_{11}^E$$

的未增劲压缩波 v_x ; 它的第二、三个解分别是色散关系

$$\rho\omega^2 = \frac{k^2}{2} \{ C_{66}^E + C_{44}^E + (e_{x5}^2 + e_{y2}^2)/\epsilon_{xx}^s \pm \sqrt{[C_{44}^E - C_{66}^E + (e_{x5}^2 - e_{y2}^2)/\epsilon_{xx}^s]^2 + 4[C_{14}^E - (e_{x5}e_{y2}/\epsilon_{xx}^s)]^2} \}$$

的增劲切变波 v_y 和 v_z 。它们的偏振方向分别是 y 和 z 方向。

2) 超声波沿 y 轴传播

$$l = y, \quad l_x = l_z = 0, \quad l_y = 1.$$

方程 (1) 成为

$$k^2 \begin{bmatrix} C_{66}^E & 0 & 0 \\ 0 & C_{11}^E + (e_{y2}^2/\epsilon_{xx}^s) & -C_{14}^E + (e_{x5}e_{y2}/\epsilon_{xx}^s) \\ 0 & -C_{14}^E + (e_{x5}e_{y2}/\epsilon_{xx}^s) & C_{44}^E + (e_{x5}^2/\epsilon_{xx}^s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \rho\omega^2 \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}.$$

它的第一个解是色散关系

$$\rho\omega^2 = k^2 C_{66}^E$$

的未增劲切变波 v_x ，偏振方向为 x 。它的第二、三个解分别是色散关系：

$$\rho\omega^2 = \frac{k^2}{2} \{ C_{11}^E + C_{44}^E + (e_{x5}^2 + e_{y2}^2)/\epsilon_{xx}^s \pm \sqrt{[C_{11}^E - C_{44}^E + (e_{y2}^2 - e_{x5}^2)/\epsilon_{xx}^s]^2 + 4[-C_{14}^E + (e_{x5}e_{y2}/\epsilon_{xx}^s)]^2} \}$$

的增劲压缩波 v_y 和增劲切变波 v_z ，后者偏振方向为 z 。

3) 超声波沿 z 轴传播

$$l = z, \quad l_x = l_y = 0, \quad l_z = 1.$$

方程 (1) 成为

$$k^2 \begin{bmatrix} C_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & C_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & C_{33}^E + (e_{z3}^2/\epsilon_{zz}^s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \rho\omega^2 \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}.$$

它的第一、二个解是色散关系

$$\rho\omega^2 = k^2 C_{44}^E$$

的未增劲切变波 v_x 和 v_y ，偏振方向分别为 x, y ；它的第三个解是色散关系：

$$\rho\omega^2 = k^2 [C_{33}^E + (e_{z3}^2/\epsilon_{zz}^s)]$$

的增劲压缩波 v_z 。

4) 超声波沿 yz 平面的 $[0, 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}]$ 方向传播

对于法线沿 yz 平面 45° 方向切取的样品而言，选新坐标系 $x'y'z'$ ，让 y' 轴与切取面法线重合， x' 与 x 轴重合，这时，超声波传播方向就是 y' 轴。即

$$l' = y', \quad l'_x = l'_z = 0, \quad l'_y = 1.$$

由于新、旧坐标变换矩阵为^[3]

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix},$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix}.$$

新坐标系中对应的弹性常数、压电应力常数及介电常数矩阵分别为

$$[C'] = [M][C][\tilde{M}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{E'} & C_{12}^{E'} & C_{13}^{E'} & C_{14}^{E'} & 0 & 0 \\ C_{12}^{E'} & C_{22}^{E'} & C_{23}^{E'} & C_{24}^{E'} & 0 & 0 \\ C_{13}^{E'} & C_{23}^{E'} & C_{33}^{E'} & C_{34}^{E'} & 0 & 0 \\ C_{14}^{E'} & C_{24}^{E'} & C_{34}^{E'} & C_{44}^{E'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}^{E'} & C_{56}^{E'} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{56}^{E'} & C_{66}^{E'} \end{bmatrix},$$

其中

$$\begin{aligned} C_{11}^{E'} &= C_{11}^E, \\ C_{12}^{E'} &= \frac{1}{2}(C_{12}^E + C_{13}^E) + C_{14}^E, & C_{13}^{E'} &= \frac{1}{2}(C_{12}^E + C_{13}^E) - C_{14}^E, \\ C_{14}^{E'} &= \frac{1}{2}(-C_{12}^E + C_{13}^E), \\ C_{22}^{E'} &= \frac{1}{4}(C_{11}^E + C_{33}^E) + \frac{1}{2}C_{13}^E - C_{14}^E + C_{44}^E, \\ C_{23}^{E'} &= \frac{1}{4}(C_{11}^E + C_{33}^E) + \frac{1}{2}C_{13}^E - C_{44}^E, \\ C_{24}^{E'} &= \frac{1}{4}(-C_{11}^E + C_{33}^E) + \frac{1}{2}C_{14}^E, \\ C_{33}^{E'} &= \frac{1}{4}(C_{11}^E + C_{33}^E) + \frac{1}{2}C_{13}^E + C_{14}^E + C_{44}^E, \\ C_{34}^{E'} &= \frac{1}{4}(-C_{11}^E + C_{33}^E) - \frac{1}{2}C_{14}^E, \\ C_{44}^{E'} &= \frac{1}{4}(C_{11}^E + C_{33}^E) - \frac{1}{2}C_{13}^E, & C_{55}^{E'} &= \frac{1}{2}(C_{44}^E + C_{66}^E) - C_{14}^E, \\ C_{56}^{E'} &= \frac{1}{2}(C_{44}^E - C_{66}^E), & C_{66}^{E'} &= \frac{1}{2}(C_{44}^E + C_{66}^E) + C_{14}^E, \end{aligned} \quad (4)$$

$$[e'] = [a][e][\tilde{M}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e'_{x5} & e'_{x6} \\ e'_{y1} & e'_{y2} & e'_{y3} & e'_{y4} & 0 & 0 \\ e'_{z1} & e'_{z2} & e'_{z3} & e'_{z4} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其中

$$\begin{aligned} e'_{x5} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(e_{x5} + e_{y2}), & e'_{x6} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(e_{x5} - e_{y2}), \\ e'_{y1} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(-e_{y2} + e_{z1}), & e'_{y2} &= \frac{\sqrt{2}}{4}(e_{y2} + e_{z1} + e_{z3} + 2e_{x5}), \\ e'_{y3} &= \frac{\sqrt{2}}{4}(e_{y2} + e_{z1} + e_{z3} - 2e_{x5}), \\ e'_{y4} &= \frac{\sqrt{2}}{4}(e_{z3} - e_{y2} - e_{z1}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e'_{x1} &= \frac{\sqrt{2}}{2} (e_{y2} + e_{x1}), & e'_{x2} &= \frac{\sqrt{2}}{4} (-e_{y2} + e_{x1} + e_{x3} - 2e_{x5}), \\
 e'_{x3} &= \frac{\sqrt{2}}{4} (-e_{y2} + e_{x1} + e_{x3} + 2e_{x5}), \\
 e'_{x4} &= \frac{\sqrt{2}}{4} (e_{y2} - e_{x1} + e_{x3}).
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$[\varepsilon'] = [a][\varepsilon][\tilde{a}] = \begin{bmatrix} \varepsilon'_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon'_{yy} & \varepsilon'_{yz} \\ 0 & \varepsilon'_{yz} & \varepsilon'_{zz} \end{bmatrix},$$

其中

$$\begin{aligned}
 \varepsilon'_{xx} &= \varepsilon_{xx}, & \varepsilon'_{yy} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) = \varepsilon'_{zz}, \\
 \varepsilon'_{yz} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{yz} - \varepsilon_{xz}).
 \end{aligned} \tag{6}$$

这样一来,在新坐标系中,超声波沿 y' 轴传播的压电增劲 Christoffel 方程为

$$k^2 \begin{bmatrix} C_{66}^{E'} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22}^{E'} + e_{y2}'^2/\varepsilon'_{yy} & C_{24}^{E'} + e_{y2}'e_{y4}'/\varepsilon'_{yy} \\ 0 & C_{24}^{E'} + e_{y2}'e_{y4}'/\varepsilon'_{yy} & C_{44}^{E'} + e_{y4}'^2/\varepsilon'_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_x \\ v'_y \\ v'_z \end{bmatrix} = \rho\omega^2 \begin{bmatrix} v'_x \\ v'_y \\ v'_z \end{bmatrix}.$$

它的第一个解是色散关系

$$\rho\omega^2 = k^2 C_{66}^{E'}$$

的未增劲切变波 v'_x , 即 v_x ; 它的第二、三个解分别是色散关系

$$\begin{aligned}
 \rho\omega^2 &= \frac{1}{2} \{ k^2 [C_{22}^{E'} + C_{44}^{E'} + (e_{y2}'^2 + e_{y4}'^2)/\varepsilon'_{yy}] \\
 &\quad \pm [k^4 (C_{22}^{E'} + C_{44}^{E'} + (e_{y2}'^2 + e_{y4}'^2)/\varepsilon'_{yy})^2 \\
 &\quad - 4k^4 (C_{22}^{E'} + (e_{y2}'^2/\varepsilon'_{yy})) (C_{44}^{E'} + (e_{y4}'^2/\varepsilon'_{yy})) \\
 &\quad + 4k^4 (C_{24}^{E'} + (e_{y2}'e_{y4}'/\varepsilon'_{yy}))^2]^{1/2} \}
 \end{aligned}$$

的增劲压缩波 v'_y 和增劲切变波 v'_z . 将 (4), (5), (6) 式代入上式, 这两组色散关系就是

$$\begin{aligned}
 \rho\omega^2 &= \frac{1}{2} k^2 (C_{44}^E + C_{66}^E) + C_{14}^E, \\
 \rho\omega^2 &= \frac{k^2}{4} \left\{ C_{11}^E - 2C_{14}^E + 2C_{44}^E + C_{33}^E + \frac{(e_{y2} + e_{x1} + e_{x5})^2 + (e_{x3} + e_{x5})^2}{\varepsilon_{xx}^E + \varepsilon_{zz}^E} \right. \\
 &\quad \pm \left[\left(C_{11}^E - 2C_{14}^E + 2C_{44}^E + C_{33}^E + \frac{(e_{y2} + e_{x1} + e_{x5})^2 + (e_{x3} + e_{x5})^2}{\varepsilon_{xx}^E + \varepsilon_{zz}^E} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. - 4 \left(C_{11}^E - 2C_{14}^E + C_{44}^E + \frac{(e_{y2} + e_{x1} + e_{x5})^2}{\varepsilon_{xx}^E + \varepsilon_{zz}^E} \right) \right. \\
 &\quad \times \left(C_{33}^E + C_{44}^E + \frac{(e_{x3} + e_{x5})^2}{\varepsilon_{xx}^E + \varepsilon_{zz}^E} \right) + 4 \left(C_{13}^E - C_{14}^E + C_{44}^E \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{e_{x3}(e_{y2} + e_{x1}) + e_{x5}(e_{y2} + e_{x1} + e_{x3} + e_{x5})}{\varepsilon_{xx}^E + \varepsilon_{zz}^E} \right)^2 \right]^{1/2} \left. \right\}.
 \end{aligned}$$

最后,我们将 LiNbO_3 的 $[C_{ij}^E]$, $[e_{ij}]$, $[\varepsilon_{ij}^E]$ 矩阵 (3) 式代入 (2) 式, 得到压电增劲弹

性常数 C_{ij}^D 的表达式

$$[C_{ij}^D] = \begin{bmatrix} C_{11}^D & C_{12}^D & C_{13}^D & C_{14}^D & 0 & 0 \\ C_{12}^D & C_{11}^D & C_{13}^D & -C_{14}^D & 0 & 0 \\ C_{13}^D & C_{13}^D & C_{33}^D & 0 & 0 & 0 \\ C_{14}^D & -C_{14}^D & 0 & C_{44}^D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^D & C_{14}^D \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14}^D & C_{66}^D \end{bmatrix},$$

其中

$$\begin{aligned} C_{11}^D &= C_{11}^E + (e_{y2}^2/\epsilon_{xx}^E) + e_{x1}^2/\epsilon_{zz}^E, & C_{12}^D &= C_{12}^E + (e_{x1}^2/\epsilon_{zz}^E) - e_{y2}^2/\epsilon_{xx}^E, \\ C_{13}^D &= C_{13}^E + (e_{x3}e_{x1}/\epsilon_{zz}^E), & C_{14}^D &= C_{14}^E - (e_{y2}e_{x5}/\epsilon_{xx}^E), \\ C_{33}^D &= C_{33}^E + (e_{x3}^2/\epsilon_{zz}^E), & C_{44}^D &= C_{44}^E + (e_{x5}^2/\epsilon_{xx}^E), \\ C_{66}^D &= C_{66}^E + (e_{y2}^2/\epsilon_{xx}^E). \end{aligned} \quad (7)$$

三、声速测量方法

我们采用本实验室改进的脉冲回波重合法装置测声速, 工作频率为 10 MHz, 时间测量的精度为 10^{-5} , 灵敏度为 0.5 ns.

我们使用两块 LiNbO_3 样品, 都切成立方体, 一块使其晶轴 a_1 和 c 分别与坐标轴 x, z 重合, 另一块样品法线方向与 y, z 轴成 45° 夹角, x 轴仍与 a_1 轴重合. 晶体表面经过 X 射线定向, 精密研磨, 误差不超过 1° . 第一块样品尺寸是 $12.806 \times 13.722 \times 14.649$ mm, 第二块是 $12.806 \times 13.595 \times 14.136$ mm. 样品密度为 4.64×10^3 kg/m³. 实验时分别使用 $0^\circ x, 0^\circ y$ 切石英换能晶片产生纵波和横波, 并用水杨酸苯酯作为耦合剂. 测量时, 回波的重合保证在 $n = 0$ (n 为回波之间误重合所错开的周数) 的条件下, 并进行反射的修正.

四、结 果

声速测量结果列入表 1 中.

我们采用 MKS 制单位, 并引用 LiNbO_3 的下列压电应力常数 e_{ij} 和介电常数 ϵ_{ij}^E 数

表 1 在室温情况下, LiNbO_3 各对称方向声速测量值

声波传播方向	[100]	[001]		[010]	[011]	
波 型	纵 波	纵 波	横 波	横 波	横 波	横 波
偏振方向	[100]	[001]	$\perp[001]$	[100]	[100]	$[0, -1/\sqrt{2}, +1/\sqrt{2}]$
速度 $v(\text{m/s})$	6548	7500	3527	3973	4067	3998
模量 $\rho v^2 (\times 10^{10} \text{ N/m}^2)$	19.89	26.10	6.10	7.32	7.68	7.42

据^[3]:

$$\begin{aligned} e_{x3} &= 3.7C/m^2, & e_{y2} &= 2.5C/m^2, \\ e_{x1} &= 0.2C/m^2, & e_{x3} &= 1.3C/m^2; \\ \epsilon_{xx}'/\epsilon_0 &= 44, & \epsilon_{zz}'/\epsilon_0 &= 29, & \epsilon_0 &= 8.854 \times 10^{-12} F/m. \end{aligned}$$

将表 1 中实验测得的各对称方向声速值分别代入前面导出的 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D 的表示式中, 得出 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D 值全部结果和 Warner^[1], Smith 等人^[4]的数据见表 2.

表 2 LiNbO₃ 全部弹性常数(单位 $\times 10^{10} N/m^2$)

C_{ij}	C_{11}^E	C_{12}^E	C_{13}^E	C_{14}^E	C_{33}^E	C_{44}^E	C_{66}^E	C_{11}^D	C_{12}^D	C_{13}^D	C_{14}^D	C_{33}^D	C_{44}^D	C_{66}^D
本 文	19.89	5.25	7.81	0.96	25.44	6.10	7.32	21.51	3.65	7.91	-1.41	26.10	9.62	8.93
文 献 [1]	20.3	5.3	7.5	0.9	24.5	6.0	7.5	21.9	3.7	7.6	-1.5	25.2	9.5	9.1
文 献 [4]	20.30	5.73	7.52	0.85	24.24	5.95	7.28							

在表 2 中, 本文的 C_{11}^E , C_{12}^E , C_{14}^E , C_{44}^E , C_{66}^E 和 D_{33} 值是直接从实验测量结果得到, 其余的 C_{13}^E , C_{33}^E 及 C_{11}^D , C_{12}^D , C_{13}^D , C_{14}^D , C_{33}^D , C_{44}^D , C_{66}^D 则根据上述导出的表示式, 在引进参考文献[3]中的 e_{ij} 和 ϵ_{ij}' 值后, 经过计算而得到. 从表 2 中可以看出, 本文与 Warner 和 Smith 结果相比, 除 C_{14}^E , C_{14}^D 相对差值为 6% 左右外, 其余的 C_{ij}^E 和 C_{ij}^D 值均与他们相近, 相对差值在 3—4% 以下.

我们可以看到, C_{14}^E 与 C_{14}^D , C_{44}^E 与 C_{44}^D 的差值很大, 说明在 LiNbO₃ 晶体中, 压电性对 C_{14} 和 C_{44} 贡献很大.

实验过程中, 晶体加工、定向等工作得到中国科学院物理研究所工厂水晶组及陈希敏同志的大力协助, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] A. W. Warner *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **42**(1967), 1223.
- [2] 刘鸿举、赵哲英、施仲坚, 物理学报, **30**(1981), 297.
- [3] B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, John Wiley, (1973).
- [4] R. T. Smith *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **42** (1971), 2219.

THE ELASTIC CONSTANTS C_{ij}^E AND C_{ij}^D OF LiNbO_3 DETERMINED BY THE ULTRASONIC "PULSE ECHO OVERLAP METHOD"

WANG RU-JU WANG JI-FANG

(Institute of Physics, Academia Sinica)

CHA JI-XUAN

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Based on the fundamental piezoelectric Christoffel's equation, we derived the expression of the elastic constants for piezoelectric crystal with trigonal symmetry point group 3m. The ultrasonic wave velocities in LiNbO_3 crystal, propagating along different crystallographic directions, are determined by the "pulse echo overlap method". The carrier frequency of rf pulse is 10 MHz. The Values of the secondorder elastic constants C_{ij}^E and C_{ij}^D for LiNbO_3 crystal are obtained as follow:

$$\begin{aligned} C_{11}^E &= 19.89, C_{12}^E = 5.25, C_{13}^E = 7.81, C_{14}^E = 0.96, C_{33}^E = 25.44, C_{44}^E = 6.10, C_{66}^E = \\ &7.32 \times 10^{10} \text{N/m}^2, C_{11}^D = 21.51, C_{12}^D = 3.65, C_{13}^D = 7.91, C_{14}^D = -1.41, C_{33}^D = 26.10, \\ &C_{44}^D = 9.62, C_{66}^D = 8.93 \times 10^{10} \text{N/m}^2. \end{aligned}$$