

掺 Fe 和掺 Cr 的 LiNbO_3 单晶的全部弹性和 压电参数的布里渊散射测量

蒋最敏 刘玉龙 张鹏翔

(中国科学院物理研究所)

1986 年 7 月 24 日收到

提 要

本文测量了抛光球形单晶样品某一晶面内的布里渊散射。从得到的声速各向异性求出 Fe: LiNbO_3 和 Cr: LiNbO_3 晶体的全部弹性和压电参数,同纯 LiNbO_3 进行了比较。讨论指出:若干弹性张量组元的正、负号不确定是由坐标系的选择造成的。

一、引 言

研究 LiNbO_3 材料的压电和光学性能是近几十年内诱人的课题。自从 1965 年成功地生长出 LiNbO_3 单晶后^[1], 每年都有成百篇文章报道。 LiNbO_3 材料极好的弹性和压电性使其被广泛地用作光电材料,非线性光学材料,以及全息存储材料。然而,纯 LiNbO_3 在应用方面仍受到一定的限制^[2]。在 LiNbO_3 中,掺入过渡元素可以大大提高全息存储性能,掺入稀土元素可以使其作为较理想的激光基质,掺 MgO 不仅可以使其长得更均匀,而且使二次谐波产生时的相匹配温度提高到大于 250°C , 从而完全消除二次谐波产生时的光损伤影响。

标志 LiNbO_3 材料性质的弹性参数和压电参数的测量首先由 Warner 等人^[3]完成。Smith 和 Welsh^[4] 扩大了 Warner 等人的测量,并且得到了参数的温度系数。但是这些方法都有一定的局限性。首先,它们都需要将换能器附在样品上作为检测器,这在某些时候影响了样品本质的测量。其次,它们都需要大块样品。虽然 Warner 等人的方法原则上样品可以小,但是过小的样品造成制备上的困难。第三,若要测量出全部弹性参数,需要好几块晶体。利用激光布里渊散射技术不仅可以避开这些困难,并且可得到更高频率($\sim 10\text{ GHz}$)的弹性参数。利用该技术,我们获得了 Fe: LiNbO_3 (含 Fe 量 0.3%) 和 Cr: LiNbO_3 (含 Cr 量 0.1%) 某些晶面内的声速各向异性,再利用计算机拟合出弹性参数和压电参数。

二、弹性、声速和布里渊散射原理

晶体的弹性形变由下列广义胡克定理描述:

$$[\sigma] = [c][e]. \quad (1)$$

$[\sigma]$, $[e]$ 分别为应力张量和应变张量的独立分量组成的矢量。 $[c]$ 为对称的 6×6 阶弹性矩阵。晶体的对称性可以使其独立的非零元素大大减少。 $[c]$ 是与一定的坐标系相对应的, X 射线定向只能确定对称轴, 但轴向可以有两个, 因而 $[c]$ 矩阵中某些元素的正、负号是没有意义的。例如若在 (xyz) 坐标系下, $[c]$ 矩阵具有下列形式:

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

而在 $x' = x, y' = -y, z' = -z$ 坐标系下, $[c]$ 矩阵将变为 $[c']$

$$[c'] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & -c_{15} & -c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & -c_{25} & -c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & -c_{35} & -c_{36} \\ & & & c_{44} & -c_{45} & -c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从上可知, 象 c_{15}, c_{25} 等的正、负号就没有意义了。

布里渊散射测量弹性的原理可简述为, 在布里渊散射中, 光子和声子相互作用时, 必须满足能量和动量守恒方程。简化后得

$$\mathbf{k}_s = \mathbf{k}_i \pm \mathbf{q}, \quad \omega_s = \omega_i \pm \omega_q. \quad (4)$$

上述第一个方程由图 1 表示, $\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_s$ 和 \mathbf{q} 分别代表入射光、散射光和参与布里渊散射的声子的波矢。 ω_q 为声子频率, 它可由布里渊散射谱仪测出。 \mathbf{q} 由散射几何配置确定。实验装置如图 2 所示。 \mathbf{q} 方向的声速 v_q 由下式确定:

$$v_q = \omega_q / |\mathbf{q}|. \quad (5)$$

改变 $\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_s$ 可以测出不同方向的 v_q , 即声速各向异性。声速各向异性和弹性参数的关系由下列方程^[5]导出:

$$[c_{ijkl}s_js_l - \delta_{ij}\rho v^2]e_k = 0. \quad (6)$$

图 1 布里渊散射中的波矢关系

c_{ijkl} 为没有考虑应变对称性、应力对称性时的 4 阶弹性张量组元。 s_j, s_l 分别为声波的传播方向的单位矢量的 j 和 l 分量, v 为声速, ρ 为介质密度, e_k 为声波偏振方向的 k 分量。 δ_{ij} 是单位矩阵矩阵元。根据 (6) 式, 编好拟合程序从 v_q 拟合出弹性参数。对于压电材料, 声波和电磁波要发生耦合。采用准静态近似分析得知, 弹性参数可修正为压电增劲弹性参数^[6]

$$c'_{kl} = \left\{ c_{kl}^0 + \frac{[e_{kj}l_j][l_i e_{il}]}{l_i \epsilon_{ij} l_j} \right\}. \quad (7)$$

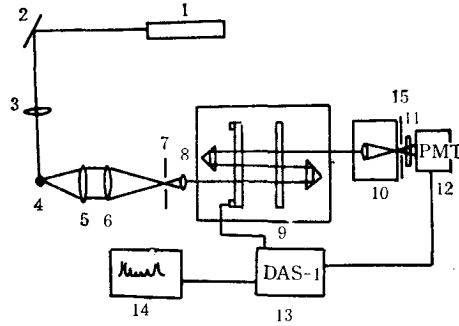


图2 布里渊散射实验装置

1 为 Ar⁺ 激光器; 2 为光束升降器; 3 为聚焦透镜; 4 为小球样品; 5 为收集光透镜; 6 为聚焦透镜; 7 为针孔; 8 为透镜; 9 为法布里-珀罗干涉仪; 10 为准直器; 11 为干涉滤光片; 12 为光电倍增管; 13 为多道分析器及自控电子学系统; 14 为记录仪; 15 为针孔

c'_{ki} 称为压电增劲弹性参数, l_i, l_j 为单位声波波矢的 i, j 分量, c_{kj} 为压电应力参数。 ϵ'_{ij} 为介电张量组元, c^E_{ki} 为无压电效应时的弹性参数。 用 (7) 式中的 c'_{ki} 代替 (6) 式中的 c_{ijkl} , 就可以得到对于压电材料声速各向异性与弹性参数和压电参数的关系, 亦即可以从布里渊散射实验获得弹性参数和压电参数。

三、结果和讨论

为了检验实验方法的可行性, 我们测了 LiNbO₃(0001) 晶面的声速各向异性。 由此得到的弹性和压电参数见表 1 (c_{ij} 单位为 $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$, e_{ij} 单位为 C/m^2)。

表 1 LiNbO₃ 的弹性和压电参数

c^E_{11}	c^E_{12}	c^E_{14}	c^E_{44}	e_{y2}	e_{x3}
19.98	5.24	1.05	5.89	2.52	3.33

结果与文献 [6] 符合得较好。 必须指出, (0001) 晶面, 不像 (10 $\bar{1}0$) 那样涉及到全部弹性和压电参数, 若要测出全部弹性参数还须将小球绕另一个方向转动, 以测出另一晶面的声速各向异性。 据此, 我们测了掺 Fe 的 LiNbO₃ (0001) 晶面和掺 Cr 的 LiNbO₃ (10 $\bar{1}0$) 晶面的声速各向异性曲线 (见图 3 和图 4, 掺 Fe 的 LiNbO₃ 的 (10 $\bar{1}0$) 晶面声速各向异性曲线与掺 Cr 的类似, 这里省去其曲线)。 其拟合结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 Fe: LiNbO₃ 的弹性和压电参数

c^E_{11}	c^E_{12}	c^E_{14}	c^E_{44}	c^E_{13}	c^E_{33}	e_{y2}	e_{x3}	e_{z1}	e_{z3}
23.2	1.39	0.53	13.3	-0.47	17.2	0.35	5.81	-3.66	-6.72

从图 3 可知, 掺 Fe 的 LiNbO₃ (0001) 晶面内纵波声速 v_L 各向异性大于横波声速 v_T , 各向异性, 这表明压电性对声速各向异性的影响是很大的。 该晶体在 -30° 时两声速同

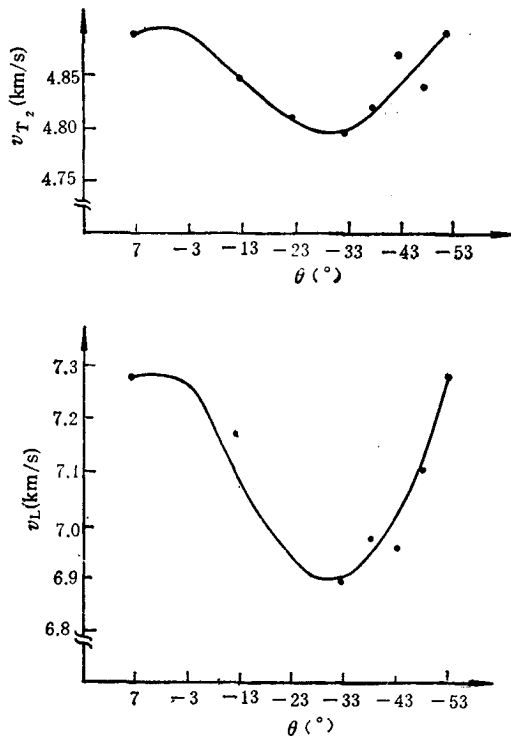


图3 掺Fe的LiNbO₃(0001)晶面内声速各向异性
 θ 为 q 与 x 轴的夹角

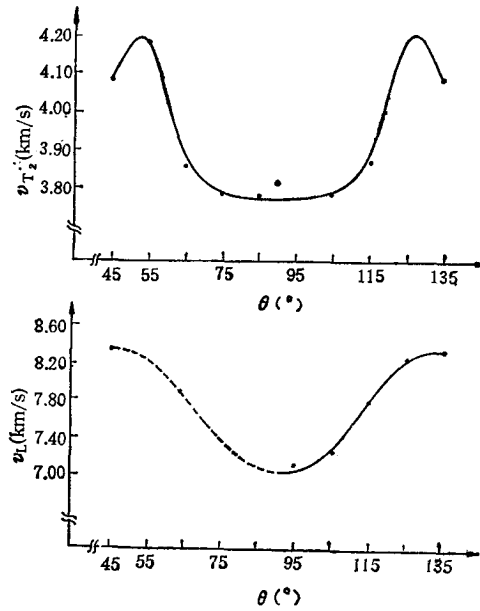


图4 掺Cr的LiNbO₃(10T0)晶面内声速各向异性
 θ 为 q 与 z 轴的夹角

表3 Cr: LiNbO₃的弹性和压电参数

c_{11}^E	c_{12}^E	c_{13}^E	c_{44}^E	c_{55}^E	c_{66}^E	e_{32}	e_{31}	e_{33}	
21.7	9.3	0.17	8.5	6.5	22.6	2.88	5.37	2.57	1.90

时达到极小,而纯的LiNbO₃在此角度下,根据我们的计算,一个达到极小,另一个达到极大。从上述数据可知,掺杂对 c_{ij} 和 e_{ij} 均有明显的影响,这可能要从杂质的性能和杂质所占的位置来解释,后者至今尚无定论^[2]。如果能得到 c_{ij} 和 e_{ij} 随不同杂质和成份变化的数据,那么对材料生产和应用无疑具有指导作用。

样品是由中国科学院声学研究所施仲坚、翁文生组提供的,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] A. A. Ballman, *J. Am. Ceram. Soc.*, 48(1965), 112.
- [2] A. Rauber, *Current Topic in Materials Science*, Vol. 1, Ed. by E. Kaldis North-Holland Publ. Comp., (1978).
- [3] A. W. Warner, M. Onoe and G. A. Coquin, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 42(1967), 1223.
- [4] R. T. Smith and F. S. Welsh, *J. Appl. Phys.*, 42(1971), 2219.
- [5] E. T. 阿雷克, E. O. 舒尔茨-杜波依斯, 激光的物理应用, 激光手册(五). 科学出版社, (1979).
- [6] B. A. 奥尔特, 固体中的声场与波, 科学出版社, (1982).

**MEASUREMENTS OF THE WHOLE SET OF THE ELASTIC
AND PIEZOELECTRIC PARAMETERS OF THE
SINGLE CRYSTALS $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ AND $\text{Cr}:\text{LiNbO}_3$
BY BRILLOUIN SCATTERING OF LIGHT**

JIANG ZUI-MIN LIU YU-LONG ZHANG PENG-XIANG

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Brillouin scattering of light from certain crystal plane of polished single crystal spheres was measured. From the obtained data of sound velocity anisotropy, all the elastic and piezoelectric parameters of the single crystals of Fe and Cr doped LiNbO_3 were deduced. The results were compared with pure LiNbO_3 . Discussion indicated that the sign uncertainty of some elements of the elastic tensor was due to the choice of the coordinates.