

研究和技术简报

用激光布里渊散射法测量单晶 LiNbO₃ 的声速及其各向异性*

张鹏翔 刘玉龙 王焕元 董长江

(中国科学院物理研究所)

近几年迅速发展起来的激光布里渊散射 (Brillouin scattering) 是研究固体、液体、气体中低频元激发的有力工具^[1,2]。在它的众多应用中, 声速及其各向异性的测量是最基本的和最重要的。

我们应用最近组建起来的布里渊散射谱仪测量了单晶 LiNbO₃ 在几个方向上纵声波、横声波的声速, 并与文献值进行了对比。初步实验表明, 目前声速测量的精度为 $\pm 1\%$, 结果可靠, 方法简便快速。也表明该布里渊散射谱仪是可靠的, 可用的。

1. 布里渊散射的基本原理

从粒子的角度最容易理解光散射的原理。把入射激光和固体中的声波都看作是由粒子组成: 光子、声子, 它们都具有能量和动量: $\hbar\omega_p$ 、 $\hbar\omega_A$, $\hbar\mathbf{K}_p$ 、 $\hbar\mathbf{K}_A$ 。脚标 P 代表光子, 脚标 A 代表声频支声子, 即固体中弹性波的量子。当一束激光射入物质时, 光子和物质中热激发的声子发生非弹性碰撞, 交换能量和动量。碰撞过程即光的散射过程遵守能量守恒:

$$\omega'_p = \omega_p \pm \omega_A \quad (1)$$

和动量守恒:

$$\mathbf{K}'_p = \mathbf{K}_p \pm \mathbf{K}_A \quad (2)$$

式中带“'”量指与声子碰撞后的光子 (散射光) 参量。由 (1) 式可知, 若测出散射光的频率 ω'_p , 或散射光相对入射光的频率移动, 就得到了声子的频率。实验上频率移动的测量是由法布里-珀罗 (Fabry-Perot, 简记 FP) 干涉仪完成的。由于激光有极好的单色性、相干性和准直性, 光子的动量是容易表达的, 为 $\hbar$ 和波矢 $\mathbf{K}_p$ 的乘积, 而 $\mathbf{K}_p$ 则表示为

$$\mathbf{K}_p = \frac{1}{\lambda} \mathbf{K}_0 \quad (3)$$

λ 为光波波长, $\mathbf{K}_0$ 为光传播方向上的单位矢量。散射过程中入射光和散射光波长变化相对很小。因此光子动量主要由传播方向决定。这样 (2) 式的矢量关系可用等腰三角形表示, $\mathbf{K}_A$ 是等腰三角形的底边, 其大小由入射、散射光束之间的夹角 θ 决定

$$|\mathbf{K}_A| = \frac{1}{\lambda} 2 \cdot n \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

式中 n 是介质折射率。

* 本文 1981 年 5 月 13 日收到。

知道了声子能量 $\hbar\omega_A$, 动量 $\hbar\mathbf{K}_A$, 便可求出声子的速度。在布里渊区中心, 声频支声子的色散关系是线性的, 声速 v 为:

$$v = \frac{\omega_A}{K_A} \quad (5)$$

2. 实验设备

图 1 是我们的布里渊散射谱仪的框图。A⁺ 离子激光器发出的激光经聚焦后打在样品上。散射光由收集透镜收集后经过针孔、检偏器后进入法布里-珀罗干涉仪。该法布里-珀罗干涉

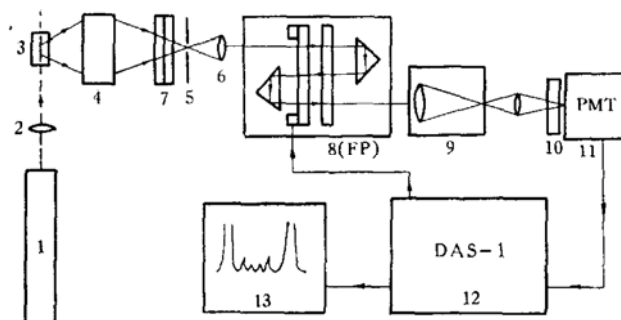


图 1 布里渊散射谱仪框图

1 A⁺ 激光器, 2 聚焦透镜, 3 样品, 4 收集透镜, 5 针孔, 6 透镜, 7 检偏器, 8 法布里-珀罗干涉仪, 9 准直器, 10 干涉滤光片, 11 光电倍增管, 12 多道分析仪及自控电子学系统, 13 记录仪

Brillouin scattering spectrometer

1 A⁺ Laser, 2 focussing lens, 3 sample, 4 collecting lens, 5, pin hole, 6 lens, 7 analyser, 8 Fabry-Perot Interferometer, 9 collimator, 10 interference filter, 11 photomultiplier, 12 multichannel analyser and electronics, 13 recorder

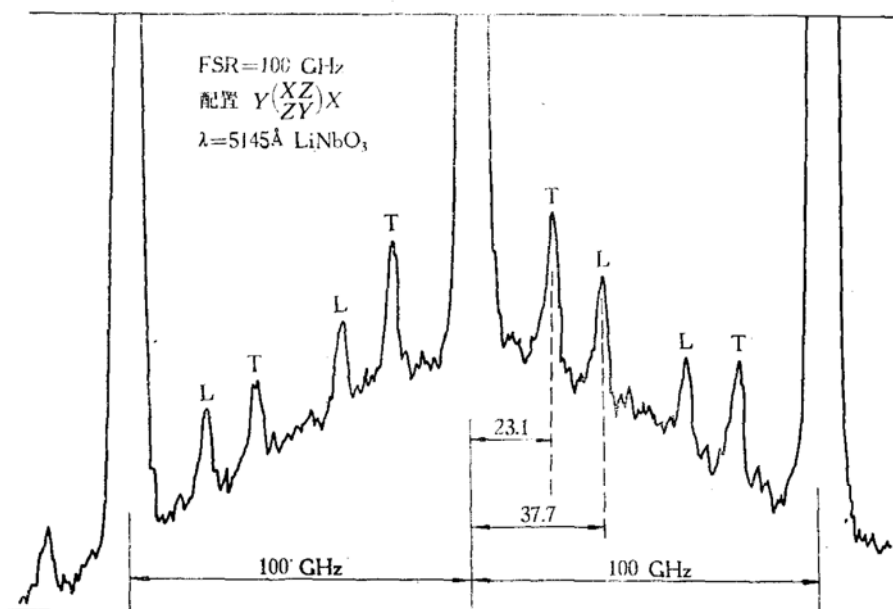


图 2 单晶 LiNbO₃ 的典型散射谱 (A⁺ 激光 5145 Å, 自由光谱区 FSR = 100GHz, 90° 散射, 沿 <110> 方向传播的声波, T, L 标明横声波, 纵声波的散射)

The typical scattering spectrum from single crystal LiNbO₃.
(A⁺ Laser 5145 Å, FSR=100GHz, 90° scattering, The propagation direction of sound is in <110>. T, L denote respectively the scattering from transverse and longitudinal waves)

仪为多通式,对比度依通过次数而定,比单通有几个数量级的提高。光电倍增管把检测到的微弱信号放大,然后经过甄别,整形以计数光子数的方式存入多道分析器中。该多道分析器同时具有控制法布里-珀罗干涉仪镜片的取向、扫描的功能(DAS-1 系统),因此工作中能自动使法布里-珀罗干涉仪锐度最佳、并进行与多道同步的、稳定的扫描。图 2 是从记录仪上获得的典型图谱。

3. 结果和讨论

LiNbO_3 单晶样品被切成长方形,长轴取向为 X ,另外两轴为 Y, Z ,表面做光学抛光。散射中均取 90° 配置,即入射光沿三轴之一,而散射光在与入射光垂直的另两个方向上分别收集。因此声子的波矢沿 $\langle 110 \rangle$ 类轴,图 2 是沿 Y 轴入射光在 X 方向接收散射光时得到的散射谱,被检测的声波是沿 $\langle 110 \rangle$ 方向传播的。谱中三个到顶的峰是与瑞利(Rayleigh)散射相应的激光频率。分别标有 $L、T$ 的小峰被识别为纵声波、横声波引起的散射。这些峰偏开入射激光的频率便是相应声子的频率。实验中自由光谱区(FSR)取为 100 GHz,法布里-珀罗镜片的扫描是线性的,因此,从偏开瑞利峰的距离直接得到相应声子的频率(已标在图中)。在 90° 散射配置下,从(4)式可直接求出声子波矢,从而可按(5)式算出声速。表 1 列出我们在几个方向下测量的声速、声子频率及相近的文献值^[3]。比较 4880 Å 和 5145 Å 两条 A^+ 离子激光器谱线测量的结果表明,该法测量声速的精度在 $\pm 1\%$ 以内。由于声波传播方向不同,很难直接比较我们测量的结果和文献结果,但不难看出,两者的差别不会很大。这说明我们的测量以及所用的谱仪是基本可靠的。进一步直接与文献值比较的实验以及对其他晶体的测量正在进行中。

表 1 单晶 LiNbO_3 在若干方向上的声速
The sound velocities of LiNbO_3 in a few directions

方 向	声子频率 (GHz)		声子波矢 (cm^{-1})	声速 (10^5cm/s)	
	横 波	纵 波		横 波	纵 波
$\langle 011 \rangle$	21.6		60848	3.55	
$\langle 01\bar{1} \rangle$	24.0	44.1	60848	3.94	7.25
$\langle 110 \rangle$	24.4	40.1	60848	4.01	6.59
$\langle 110 \rangle$	23.1	37.7	57714	4.00	6.53
$\langle 100 \rangle, X$				4.0593*	
$\langle 010 \rangle, Y$				3.9615*	6.8822*
$\langle 001 \rangle, Z$				3.5740*	7.3328*

* 均取自文献[3]误差为 $\pm 0.1\%$ 。

和传统的声速测量方法相比激光布里渊散射法测量声速的精度还差些,但它的优点是明显的。首先,测量以光子为探针,检测热激发的声子,是无接触测量,也不需要样品表面上制作换能器(如义指换能器),这就避免了因蒸镀介质、金属膜带来的可能干扰。其次,激光束聚焦很细(如 0.1 mm 直径),即便很小的样品,用其他方法不能测量的样品,该法也是合用的、方便的。对样品的唯一要求是取向和表面抛光。除了声速之外,该法还能得到另外一些信息,如

声子寿命, 声子与其他因素的相互作用。声子的寿命是从散射峰的线宽测量得到的。目前我们的 A_1^+ 离子激光器线宽较大, 使我们很难得到关于热声子寿命的信息, 改进测量系统这种测量是完全可行的。

声速测量是测量材料弹性参数等一系列有用参数的基础。因此作为新的有力工具的布里渊散射法近年来发展迅速, 取得的成果十分引人注目。尤其值得重视的是, 多通技术和自动控制电子学系统的采用, 大大提高了布里渊谱仪的对比度^[4], 使该类谱仪不仅可测量透明、半透明材料, 也可测量不透明、甚至金属^[5]、非晶态材料^[6], 不仅可测量声子还可测量自旋波的散射。因此, 布里渊散射已成为研究、标证各种新材料、研究相变的强有力工具。目前它的研究领域还在不断地扩大。

参 考 文 献

- [1] Pine, A. S., *Light Scattering in Solids*, ed. by M. Cardona (Spring-Verlag 1975).
- [2] 张鹏翔, 磁性材料中的光散射, 待发表于“物理进展”。
- [3] Smith, R. T., Welsh, F. S., *J. A. P.*, **42**(1971), 2219.
- [4] Sanderecock, J. R., *Light Scattering in Solids* ed. by M. Balkanski, (Paris: Flammarion Press (1971), 9.
- [5] Sanderecock, J. R. and Wettling, W., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-14**(1978), 442.
- [6] Chang, P. H., Malozemoff, A. P., Grimsditch, M. Senn, W. and Winterling, G., *Solid State Commun.*, **27**(1978), 617.

THE SOUND VELOCITY AND ITS ANISOTROPY OF SINGLE CRYSTAL LiNbO_3 MEASURED BY BRILLOUIN SCATTERING TECHNIQUE

ZHANG Peng-xiang LIU Yu-long
WANG Huan-yuan DONG Chang-jiang
(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

A novel method, Brillouin scattering technique, was used to study the sound velocity and its anisotropy of single crystal LiNbO_3 . The agreement between our result and the one by traditional method shows that this method has the advantages of simplicity, quick and higher reliability. It is especially suitable for small samples, the sound velocity of which is difficult to measure by other means.