

# 在集成光学声光器件中表面声波相速的测定

王 宝

(上海大学 CAD 所, 上海 200032)

胡鸿章

(天津大学物理系, 天津 300072)

**提要** 基于共线声光耦合测定了质子交换的  $\text{LiNbO}_3$  波导中的表面声波的相速, 该测量方法简便、准确, 精度达  $1 \times 10^{-3}$ , 稍加变动可推广到非质子交换的其他波导的情形。

**关键词** 表面声波, 声光耦合, 光波导

## 1 引 言

迄今已经提出了许多测定表面声波速度的实验方法<sup>[1,2]</sup>。这些方法中的大多数是基于测定表面声波脉冲在距离已知的输入传感器与输出传感器之间的传播时间, 有些则是测定在一定声频下表面声波的波长<sup>[3]</sup>。这些测量方法往往需要特殊的甚至很复杂的仪器, 测量精度约为  $2.5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ 。

本文提出了一种基于共线声光耦合精确测定表面声波速度的方法, 它只需要常规的旋转工作台, 而测量精度可达  $1 \times 10^{-3}$ 。虽然文中是针对质子交换的  $\text{LiNbO}_3$  波导进行测量的, 但是这个方法也可以推广到其他场合。

## 2 测量原理

测量原理是基于共线声光耦合下的 TE-TM 模转换。下面的讨论是针对质子交换的  $\text{LiNbO}_3$  波导中传播的表面声波的。设晶体是  $x$  切的, 波导沿着  $y$  轴方向。当光波在这样的波导中传播时, TE 模作为非常光传播, TM 模作为寻常光传播。声波的存在导致 TE 模与 TM 模之间的转换。在转换时必须满足位相匹配条件:

$$n_{\text{eff, TM}} = n_{\text{eff, TE}} \pm \lambda f_a / v_a \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff, TE}}$  是 TE 模的有效折射率,  $n_{\text{eff, TM}}$  是从 TE 模转换而来的 TM 模的有效折射率,  $\lambda$  是光波在真空中的波长,  $f_a$  和  $v_a$  分别是表面声波的频率和相速。等式右方的“+”号和“-”号分别对应于一个声子的消失和产生。

在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中质子交换 ( $\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Li}^+$ ) 导致  $e$  折射率的增加 ( $\Delta n_e > 0$ ) 和  $o$  折射率的稍许减小 ( $\Delta n_o < 0$ )。因此, TM 模不是导模, 它会辐射到基底中去。TM 模在基底中的偏转角  $\alpha$  (见图 1)

由下式给出

$$n_{\text{eff, TM}} = n_o \cos \alpha \quad (2)$$

式中  $n_o = 2.2869$  是  $\text{LiNbO}_3$  晶体的  $o$  折射率(当  $\lambda = 633 \text{ nm}$  时)。设出射端面与波导表面垂直。TM 模在晶体外的出射角  $\gamma$  可由折射定律求出

$$\sin \gamma = n_o \sin \alpha \quad (3)$$

由式(2)和(3)得到

$$n_{\text{eff, TM}} = (n_o^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2} \quad (4)$$

因此,从 TE 模转换来的 TM 模的有效折射率可

由它的出射角  $\gamma$  来决定。

另一方面,即使不存在声波,由于质子交换会产生内应力,也会引起 TE 模与 TM 模之间的转换。我们将这种类型的模转换称为静态模转换;相应地,将涉及声子的产生或消失的模转换称为动态模转换。在静态模转换的情形,位相匹配条件为

$$n_{\text{eff, TM}} = n_{\text{eff, TE}} \quad (5)$$

设在这种情形 TM 模的出射角为  $\gamma_0$ ,从式(4)和(5)得到

$$n_{\text{eff, TE}} = (n_o^2 - \sin^2 \gamma_0)^{1/2} \quad (6)$$

因此,只要测定存在声波和不存在声波时从 TE 模转换来的 TM 模的出射角  $\gamma$  和  $\gamma_0$ ,从式(4)和(6)分别求出  $n_{\text{eff, TM}}$  和  $n_{\text{eff, TE}}$ ,再代入式(1),在已知  $\lambda$  和  $f_s$  的前提下可得出表面声波的相速  $v_s$ 。

### 3 实验和结果

波导是在  $x$  切  $\text{LiNbO}_3$  晶片上经过质子交换制成的。波导沿着  $y$  轴方向,长度约 10 mm,宽度约  $50 \mu\text{m}$ 。关于质子交换的工艺在文献[3]中已有详细叙述。简言之,交换是在用 0.01 mol 的苯酸锂稀释的苯酸中在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度下进行的。交换时间为 15 小时 20 分钟。交换之后,用光刻方法制备一个金属铝的叉指式换能器(IDT)。

在测量时,用显微镜(100 倍)将氦氖激光器射出的偏振光束( $\lambda = 633 \text{ nm}$ )聚焦到波导的入射端(见图 2),入射光的电场方向与  $z$  轴平行。转换来的 TM 模从样品的另一端射出,并射到一个光电二极管上。为了测定 TM 模的出射角,样品装在一个旋转工作台上,样品表面与台面垂直,而且它的出射端面的中线  $S$  与旋转工作台的转轴重合。利用精密游标可将转角读准到  $1'$ 。再利用另一支氦氖激光管,用自准直法将它射出的光束调整到与样品出射端面垂直,并对准中线  $S$ 。然后转动工作台,直到从样品出射端面反射的激光束也射到光电二极管的中心。测出工作台的转角  $\theta$ ,则出射角  $\gamma = 2\theta$ 。

我们制备的波导的厚度约为  $4 \mu\text{m}$ ,它能支持 9 个 TE 导模。其中,  $\text{TE}_0 - \text{TE}_3$  的有效折射率比  $n_o$  大,因此,不能通过静态模转换从它们产生 TM 模。 $\text{TE}_4 - \text{TE}_8$  的有效折射率比  $n_o$  小,它们具

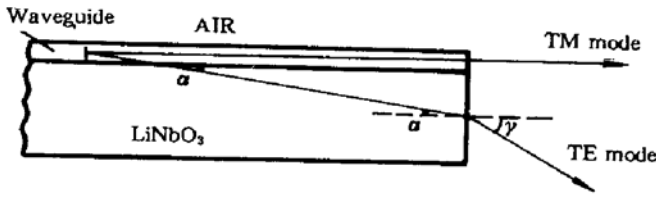


Fig. 1 Propagating direction of the converted TM mode

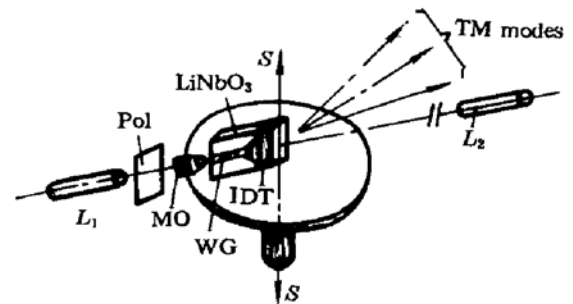


Fig. 2 Schematic experimental setup  
 $L_1, L_2$ : He-Ne laser; Pol: polarizer; MO: microobjective;  
WG: waveguide; IDT: interdigital transducer

有对应的静态模转换的 TM 模。测得的 TM 模的出射角  $\gamma_0$  及计算出来的有效折射率如表 1 中的第 2、3 列所示。当施加频率  $f_a = 305.4$  MHz 的声波时,由于声光耦合从各个 TE 导模转换来的 TM 模的出射角  $\gamma$  及相应的有效折射率  $n_{\text{eff, TM}}$  如表 1 中第 4、5 列所示,利用公式(1)所求出的声速列于表 1 的最后一列。所列的 5 个  $v_a$  值是相互独立的。如果不考虑其误差明显偏高的一次测量 (TE<sub>7</sub>),则  $v_a$  的平均值为 3448 m/s,均方根误差为 3.4 m/s,即 0.1%。利用的平均值和公式(1)可以求出导模 TE<sub>0</sub>—TE<sub>3</sub> 的有效折射率,结果也列于表 1。

**Table 1 Exit angles of TM modes, mode indices and acoustical velocity**

Mode	Static $\gamma_0$	Conversion $n_{\text{eff, TE}}$	Dynamic $\gamma$	Conversion $n_{\text{eff, TM}}$	Acoust. velocity $v_a$ (m/s)
TE <sub>0</sub>		2.3072	23°46'	2.2511	
TE <sub>1</sub>		2.3019	25°36'	2.2457	
TE <sub>2</sub>		2.2960	27°32'	2.2397	
TE <sub>3</sub>		2.2874	30°10'	2.2310	
TE <sub>4</sub>	12°24'	2.2768	33°13'	2.2203	3448
TE <sub>5</sub>	18°58'	2.2637	36°46'	2.2072	3454
TE <sub>6</sub>	24°44'	2.2483	40°50'	2.1914	3441
TE <sub>7</sub>	30°15'	2.2307	45°12'	2.1740	3466
TE <sub>8</sub>	35°45'	2.2110	50°12'	2.1540	3448

## 4 结束语

我们已经利用声光耦合测定了在质子交换 LiNbO<sub>3</sub> 波导中传播的表面声波相速,测量相速的精度达  $1 \times 10^{-3}$ ,在频率从 290~410 MHz 的范围内,声速随频率的变化是近似线性的。

本文是针对质子交换的 LiNbO<sub>3</sub> 波导进行讨论的。对于其它波导,只要存在共线声光耦合,由式(1)表示的位相匹配条件总是成立的。即使在声光耦合中转换来的模不是基底辐射模,不能根据出射角来测定有效折射率,然而可以用棱镜耦合法测出有关的有效折射率,因此本文提出的方法仍然适用。

## 参 考 文 献

- 1 M. R. Daniel, J. de Klerk. An apparatus for measuring the velocity and energy flow direction of ultrasonic surface waves. *Rev. Sci. Instrum.*, 1970, **41**(10): 1441~1463
- 2 W. P. Robbins, E. P. Rudd. Measurement of surface acoustic wave slowness curves with a scanning laser acoustic microscope. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(3): 1040~1043
- 3 V. Hinkov. Proton exchanged waveguides for surface acoustic waves on LiNbO<sub>3</sub>. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(9): 3694~3699

## Measurements of the Phase Velocity of the Surface Acoustic Wave in the Integrated Acousto-optic Devices

Wang Bao

(Institute for CAD, Shanghai University, Shanghai 200032)

Hu Hongzhang

(Department of Physics, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** Based on colinear acousto-optic coupling, the phase velocity of surface acoustic wave propagating in proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides is measured. This measuring method is very simple and an accuracy of  $1 \times 10^{-3}$  has been obtained. With a little modification it can also be applied to waveguides which are fabricated by other processes besides proton-exchange.

**Key words** surface acoustic wave, acousto-optical coupling, optical waveguide

---

## 第七届全国激光检测与应用技术交流会 在安徽屯溪召开

1994年8月16~20日中国光学学会、中国航空学会在安徽屯溪召开了第七届全国激光检测与应用技术交流会,出席会议的有来自全国12个省、市、自治区的64位代表。这次会议共收到论文64篇,分别涉及激光全息无损检测及干涉计量,激光散斑无损检测及干涉计量,激光光纤检测技术及应用,激光尺寸、形状、位置测量技术,激光多普勒测量技术,激光参量测试技术,激光在线检测技术,激光显示技术,激光超声检测新技术等方面。其中57篇论文参加了大会交流,54篇论文收入本届会议文集。

这次会议学术气氛浓厚,代表们在技术交流的同时,还深入讨论了在社会主义市场经济的大形势下,激光检测工作如何适应市场经济、面向工程的问题。

代表们建议两年后的下届会议由南昌航空工业学院、江西省激光学会与中国航空工业总公司621所承办。

(苏笑珍)