

# 铌酸锂光波导中的共振声光耦合和它在 表面声波相速测定中的作用

胡鸿璋 赵 慈 詹仰钦

(天津大学应用物理系, 天津 300072)

**提要** 报道了在质子交换的铌酸锂波导中出现的在静态模转换和动态模转换之间的一种耦合现象, 提出了这一现象初步的定性解释, 并且应用这一现象来测定表面声波的相速及其色散, 获得了与其他测试方法相一致的结果。

**关键词** 集成光学, 铌酸锂光波导, 声光耦合, 表面声波

## 1 引 言

在质子交换的铌酸锂波导中出现的导模与基底辐射模之间的转换现象已经被广泛地研究过<sup>[1~5]</sup>, 并且在集成光学领域中有着重要的应用。例如, 利用这一现象可以制成偏振器、射频频谱分析器及光束扫描器等。本文报道了在质子交换的铌酸锂波导中观察到的在动态模转换与静态模转换之间的耦合现象, 我们称它为共振声光耦合。下面将描述这一现象, 对这一现象提出一种初步的定性的解释, 并且利用这一现象来测定表面声波的速度及其色散, 测定结果与其他方法是一致的。

## 2 共振声光耦合现象及其解释

质子交换波导是在  $x$  切铌酸锂基底上制作的, 波导宽为  $50 \mu\text{m}$ , 长约  $10 \text{mm}$ , 沿着  $y$  轴方向。质子交换工艺是常规的<sup>[6]</sup>。交换之后, 用光刻和溅射方法制备一个金属铝的叉指式换能器, 用来激发表面声波。所用的激光是由功率为  $2 \text{mW}$  的 He-Ne 激光器发出的波长为  $633 \text{nm}$  的线偏振光, 通过端面耦合进入光波导。入射光的电场方向与晶片  $z$  轴平行 (TE 模)。

由于质子交换会产生内应力, 即使不存在表面声波, 在光波导中传播的 TE 模也会转换为 TM 模。我们将这种没有声子参予的 TE/TM 模转换称为静态模转换。它要满足如下的位相匹配条件<sup>[5]</sup>

$$n_{\text{eff, TM}} = n_{\text{eff, TE}} \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff, TM}}$  和  $n_{\text{eff, TE}}$  分别是 TM 模和 TE 模的模折射率。

当存在声波时, 波导中的 TE 模还可以通过声光耦合转换为 TM 模。这种模转换要满足如

下的位相匹配条件

$$n_{\text{eff, TM}} = n_{\text{eff, TE}} \pm \lambda f_s / v_s \tag{2}$$

式中  $\lambda$  是光波波长,  $f_s$  和  $v_s$  分别是声波的频率和相速。上式实质上就是共振声光相互作用中的动量守恒条件, 它的右方的“+”和“-”号分别对应于一个声子的湮灭与产生。我们将这种涉及声子的 TE/TM 模转换称为动态模转换。

由式(2)可见, 在动态模转换中产生的 TM 模的模折射率随  $f_s$  而改变, 因而它的出射角也随  $f_s$  而改变<sup>[5]</sup>。当这一出射角与通过静态模转换产生的某一 TM 模的出射角相等, 因而两者重合时, 它的强度会大大增强。图 1 绘出了在动态模转换中从 TE<sub>1</sub> 模产生的 TM 模的强度随声频的变化。图中峰值正对应于 TE<sub>6</sub> 模的静态模转换的位置。以检测计输出的电压的伏特值来衡量光强度, 当动态模转换和静态模转换单独存在时, 产生的 TM 模的强度分别为 2.3 和 1.4, 而二者重合时, 强度为 6.1 (见图 1 中的峰值), 比两者之和还要强得多。这是我们在实验中观察到的一种有意义的耦合现象, 我们称它为共振声光耦合。下面我们针对这一现象提出一种初步的定性的解释。

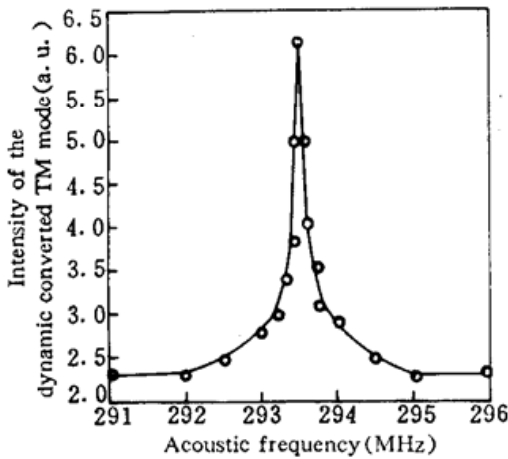


Fig. 1 The intensity of the dynamic converted TM mode versus acoustic frequency

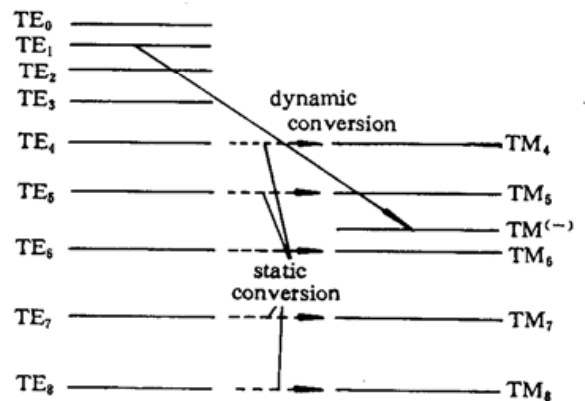


Fig. 2 Schematic diagram of phase matching in the static and dynamic conversion

我们用与能级图相似的图像来描述共振声光耦合中的动量守恒关系。为此, 我们用一系列水平短线来表示诸 TE 模, 而且让它们的高度与模折射率成正比(图 2), 因而也就与光子动量成正比。在静态模转换中产生的 TM 模的模折射率是不变的, 因此, 我们用水平箭头来表示静态模转换。图 1 中的 TM<sub>4</sub>, TM<sub>5</sub>, …, TM<sub>8</sub>, 就表示由静态转换产生的 TM 模, TM 模的模折射率是连续变化的。这里的下标并不表示这些 TM 模是离散的, 只是表示它们是从哪一个 TE 模转换来的。在动态模转换中产生的 TM 模的模折射率是改变的, 因此用非水平的箭头来表示动态模转换。图 2 中的 TM<sup>(-)</sup> 模就表示由 TE<sub>1</sub> 模放出一个声子转换而来的 TM 模。当  $f_s$  逐渐增大, 使 TM<sup>(-)</sup> 与 TM<sub>6</sub> 重合时, 就出现共振耦合。我们认为, 在这种情形下, 除了直接由 TE<sub>1</sub> 模释放一个声子转换成 TM 模外, 还存在一个二级过程, 也产生同样的 TM 模。这个二级过程就是

$$\text{TE}_1 \xrightarrow{\text{dynamic}} \text{TE}_6 \xrightarrow{\text{static}} \text{TM}_6$$

因为其中的每一步都满足位相匹配条件, 所以这个二级过程的效率是非常高的。这个二级过程与直接的声光耦合过程互相加强, 就使得产生的 TM 模的强度明显地增强, 这也就是我们将这个现象称为共振声光耦合的原因。

### 3 应用

这一共振声光耦合现象的应用有待于进一步的探讨。这里我们仅利用它来测定表面声速。以上述  $TE_1$  和  $TM_6$  之间的共振声光耦合为例, 从式(1)和式(2)得到

$$n_{\text{eff}, TM_6} = n_{\text{eff}, TM_1} - \lambda f_s / v_s \quad (3)$$

$$n_{\text{eff}, TM_6} = n_{\text{eff}, TE_6} \quad (4)$$

由以上二式得到

$$v_s = \frac{\lambda f_s}{n_{\text{eff}, TE_1} - n_{\text{eff}, TE_6}} \quad (5)$$

Table 1 The modal indices of TE modes

Mode	$TE_0$	$TE_1$	$TE_2$	$TE_3$	$TE_4$	$TE_5$	$TE_6$	$TE_7$	$TE_8$
$n_{\text{eff}, TE}$	2.3072	2.3019	2.2960	2.2874	2.2768	2.2637	2.2483	2.2307	2.2110

Table 2 Acoustic velocity measured by means of "resonance" method

Original mode and final mode (in "resonance" process)	$f_s$ (MHz) (by "resonance")	Acoust. Velocity $v_s$ (m/s)
$TE_1 \rightarrow TM_6$	293.5	3466
$TE_3 \rightarrow TM_7$	310.0	3458
$TE_0 \rightarrow TM_6$	320.0	3436
$TE_2 \rightarrow TM_7$	352.5	3415
$TE_4 \rightarrow TM_8$	354.5	3411
$TE_1 \rightarrow TM_7$	384.1	3410
$TE_0 \rightarrow TM_7$	411.0	3395

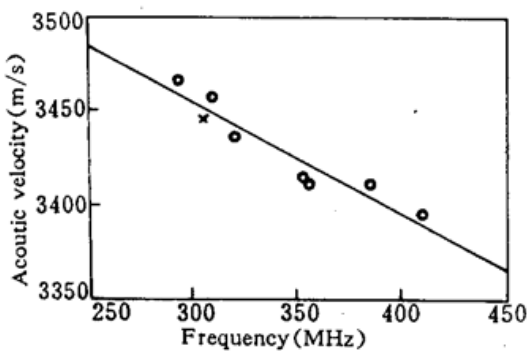


Fig. 3 Variation of the acoustical velocity with frequency

我们制作的波导能支持 9 个 TE 模 ( $TE_0 \sim TE_8$ )。这些 TE 模的模折射率既可以用常规的棱镜耦合法测定, 也可以根据由它们转换来的 TM 模的出射角计算出来。在文献[5]中已采用后一方法计算出这些 TE 模的模折射率(见表 1)。因此测出共振声光耦合时的声频  $f_s$ , 就可以根据式(5)计算出声速  $v_s$ 。由于共振是非常尖锐的, 亦即当  $f_s$  稍有改变时, 共振强度就显著下降(见图 1), 所以共振时的声频  $f_s$  可以准确地被测定。对不同的

初态和终态测出的共振声频  $f_s$  及相应的声速  $v_s$  列于表 2, 并示于图 3。从图 3 可见, 在 290 ~ 410 MHz 的频率范围内, 表面声波的相速与声频近似地成线性关系, 可以表示为

$$v_s = 3642 - 0.62f_s \quad (6)$$

式中  $v_s$  的单位为 m/s,  $f_s$  的单位为 MHz。在图 3 中还用“×”号画出了在文献[5]中的测量结果 ( $f_s = 305.4$  MHz,  $v_s = 3448$  m/s), 它也处在由式(6)表示的直线附近。这说明两种测量的结果是一致的。

## 参 考 文 献

- 1 W. Sohler. Integrated optics in LiNbO<sub>3</sub>. *Solid Thin Film*, 1989, 175(2) : 191~200
- 2 V. Hinkov, U. Nolte, W. Sohler. in 1989 Tech. Digest Series, 4, Integrated and Guided-Wave Optics, Optical Society of America, Washington DC, 1989. 138
- 3 H. Z. Hu, H. Lausen. Collinear acoustooptical interaction in annealed proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides. *Chinese J. Laser*, 1992, 1(6) : 527~536
- 4 B. Wang, H. Z. Hu, C. Zhao. Measurements of refractive index profiles of proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides using TE-TM mode conversion. *Chinese J. Lasers*, 1994, B3(2) : 143~150
- 5 王 宝, 胡鸿璋. 在集成光学声光器件中表面声波相速的测定. *中国激光*, 1994, A21(10) : 795~797
- 6 V. Hinkov. Proton exchanged waveguides for surface acoustic waves on LiNbO<sub>3</sub>. *J. Appl. Phys.*, 1987, 62(9) : 3573~3577

## Resonant Acoustooptic Coupling in LiNbO<sub>3</sub> Waveguides and Its Application for Measurement of Phase Velocity of SAW

Hu Hongzhang Zhao Ci Zhan Yangqin

(Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** A coupling phenomenon between static and dynamic mode conversion in proton-exchanged (PE) LiNbO<sub>3</sub> waveguides, called as resonant acoustooptic coupling is reported. A preliminary and qualitative explanation of this phenomenon is presented. In addition we have applied it to the measurements of the phase velocity of surface acoustic wave (SAW). Its variation with acoustical frequency is studied and the results are in accordance with other measuring methods.

**Key words** integrated optics, LiNbO<sub>3</sub> waveguide, acoustooptical coupling, surface acoustic wave