

# Ti 扩散铌酸锂光波导特性的热固定技术

陈 铮 万京春

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

## 提 要

在 Ti 扩散铌酸锂光波导中, 因光致折变效应而导致光波导特性漂移. 在光波相干性的导波光器件中, 光致折变效应的影响尤为严重. 本文报道了稳定光致折变效应的热固定技术实验结果; 并提出在光波导特性的热固定过程中, 不是  $H^+$  离子起主导作用这一看法.

**关键词** Ti 扩散铌酸锂光波导, 热固定技术.

## 1 前 言

Ti 扩散铌酸锂光波导的不稳性是指器件的特性随时间而发生漂移, 这是研究人员长期以来探索的一个重要课题<sup>[1-4]</sup>. 产生这种漂移的因素有两类, 一是与光致折变(光损伤)有关, 另一个是与光通过器件与否无关的. 在集成光学器件中, 特别是在对光波进行相位或波前控制的器件中[例如定向耦合器, 马赫-陈德尔(Mach-Zehnder)干涉器], 光致折变造成的器件特性漂移尤为严重, 它完全破坏了器件的正常工作状态. 早期认为导波光沿晶体光轴  $Z$  传输时, 光波导抗光损伤能力强<sup>[5]</sup>, 但深入的研究发现  $Z$  传输的光波导同样存在光致折变效应, 它是以模式转换的形式反映出来<sup>[6]</sup>.

对于已经制作好的 Ti 扩散光波导器件, 可以采用某种后续处理, 使其特性稳定下来. 作者使用对光致折变效应反应灵敏的马赫-陈德尔干涉器结构, 采用微机对光波导特性漂移进行实时监测, 观测到器件特性严重不稳. 本文并采用“热固定技术”, 对光波导作后续处理, 克服了光致折变效应造成的器件特性漂移. 从文中设计的特定实验取得的结果, 作者认为  $H^+$  离子在“热固定”过程中不起主要作用.

## 2 测试技术

实验用的器件结构如图 1 所示, 在  $X$  切割铌酸锂晶片上, 通过光刻工艺, 制作出如图 1 所示的厚度为 30 nm 的 Ti 条图案. Ti 条与晶体光轴  $Z$  方向垂直, 宽为 3.5  $\mu\text{m}$ . 在 1050°C 的湿氧气氛下扩散 5 hr, 组成 Ti 扩散铌酸锂条形光波导构成的马赫-陈德尔干涉器, 并将晶片两端进行抛光, 完成了实验用器件的制作.

当激光束经 40 $\times$  显微镜物镜会聚, 端射耦合入光波导 A 端, 导波光在入射端的 Y 分岔波导处被分成两路. 两路光各经过干涉器的一支臂后到输出端 Y 分岔波导处会合, 相干之后从 B 端输出. 在制作工艺中很难将 Y 分岔波导作得完全对称, 也就是说, 输入端 Y 分岔波导不可

能把导波光分成强度完全相等的两路光. 并且, 马赫-陈德尔干涉器两条臂的特性也不可能绝对相同, 亦即光波通过这两条光波导的光程不可能刚好相等. 因此, 从马赫-陈德尔干涉器输出的相对光功率通常可写为

$$P_{out} = \frac{1}{2}(|E_1| - |E_2|)^2 + 2 \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \cos^2(\Delta\varphi), \quad (1)$$

式中  $|E_1/E_2|^2$  为干涉器两臂中传输的导波光功率比.

不考虑传输损耗和分岔波导的插入损耗时,  $|E_1|^2 + |E_2|^2 = 1$ .  $2 \cdot \Delta\varphi$  表示光通过干涉器两臂的相位差. 如

果马赫-陈德尔干涉器两臂中光强不等, 则导波光在两臂中所造成的光致折变效应的强弱也不同. 设在一臂中光致折变为  $\delta n_1(t)$ ; 另一臂为  $\Delta n_2(t)$ . 于是相位差  $\Delta\varphi$  可写为

$$2\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + (2\pi/\lambda)L[\Delta n_1(t) - \Delta n_2(t)], \quad (2)$$

式中  $\Delta\varphi_0$  为未通过光时波导结构不对称引入的初始相位差;  $\lambda$  为真空中的光波波长;  $L$  为马赫-陈德尔干涉器一个臂的长度. (2) 式中右端第二项表示光致折变效应引入的相位差, 它是通光强度和通光时间的函数. 如果干涉器结构完全对称, 两臂中传输的光强相等,  $\Delta\varphi$  就不会是时间  $t$  的函数了.

本文的实验监测系统如图 2 所示. 激光束经斩波器后由分束器分成两束光, 一束光作为参考光投射到光电探测器 RD 上, 得参考光电信号; 另一束光通过  $40\times$  显微镜物镜会聚后, 端射耦合入样品 A 端. 样品 B 端波导输出的光经透镜会聚到光电探测器 SD 上, 得信号光的电信号. 参考光的电信号和马赫-陈德尔干涉器输出光的电信号经 A/D 变换器转变为数字信号.

再由微机对两路信号进行数字滤波, 相除得到归一化讯号, 用以表示马赫-陈德尔干涉器的稳定性. 由于本系统采用参考光与信号光之比作为马赫-陈德尔干涉器的光信号输出, 就可以在较长时间的监测周期中, 较好地消除了光源、电源波动对测试带来的不可接受的误差.

为了使光致折变效应更突出, 本文采用  $632.8\text{ nm}$  的 He-Ne 激光器作为光源. 对大量样品进行监测, 均观察到光致折变效应造成的器件特性漂移. 图 3 中曲线 a 为计算机绘出的马赫-陈德尔干涉器的特性漂移情况. 可以看出, 在几十分钟连续通光过程中, 器件的光功率输出呈现如此严重漂移, 根本不可能实际运用.

### 3 热固定技术

图 3(a) 所示的马赫-陈德尔干涉器特性漂移是 Ti 扩散铌酸锂光波导中光致折变效应所至, 其机理是, 由于在光波导中存在  $\text{Fe}^{2+}$  这类离子, 在光作用下离化出一个电子而变为  $\text{Fe}^{3+}$  离子. 由于铌酸锂晶体结构的不对称性, 使离化出的电子沿晶体的光轴  $+Z$  方向运动, 到达波导边缘处被一些浅的陷阱俘获. 于是在通光波导中, 出现了沿  $+Z$  方向的空间电荷场. 这个静电场通过电光效应使波导区折射率下降, 称之为光致折变效应或光损伤. 光致折变效应与光波

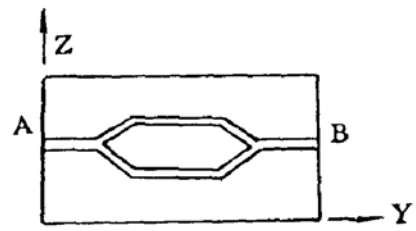


Fig. 1 The configuration of experimental Mach-Zehnder interferometer

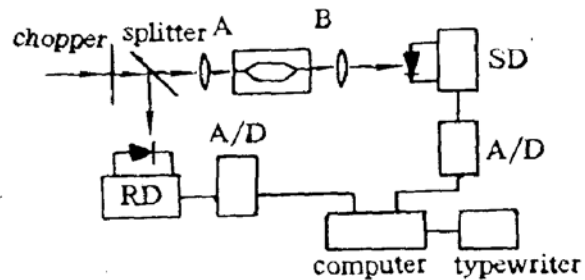


Fig. 2 The monitoring system for measuring photorefractive effect

波长和通光功率密度有关,短波光使  $\text{Fe}^{++}$  更易于离化. 由于条形光波导中光功率密度相当高,光损伤就显得尤为严重. 图 3(a)曲线并未下降到零,这是因为(1)式中  $E_1$  和  $E_2$  不相等的缘故. 也正是两臂中传输的导波光功率不等,导致两臂光致折变效应不同,才可用本文所述测试方法来观测器件特性漂移.

由于在浅陷阱中的电子不稳定,因温升或外界光照,这些电子有可能脱离浅陷阱而又返回离化中心去. 这种光离化、俘获、再放出均是由随器件工作历程、运行状态以及外界环境等随机因素决定. 因此器件呈现出的特性漂移千姿百态. 从上所述可知,使器件的特性稳定下来成为制作实用器件的当务之急.

要使光波导不发生光折变效应或使这一效应的影响很小,采用所谓“热固定”技术措施是使这些光离化的电子在空间分布上稳定下来. 将样品加热到  $150^\circ\text{C}$  左右,并保持耦合入马赫-陈德尔干涉器中较高的光功率,经半小时处理,然后去掉入射光,并使样品冷却到室温,次日测得输出光功率随时间的漂移情况,如图 3(b)曲线所示. 与图 3(a)曲线相比,可以看出样品的特性被稳定下来了. 将经过“热固定”的样品,在不通光的条件下加热到超过“热固定”处理温度(实验中取  $200^\circ\text{C}$ ),维持半小时,然后冷却到室温,次日测得的特性漂移如图 3(c)曲线所示. 可以看出,该马赫-陈德尔干涉器又回复到特性极端不稳定这一状态,图 3(d)为对这一器件再次进行“热固定”处理后,所测得的特性漂移曲线,从图 3(d)曲线形貌可知,该器件的特性又再次固定下来. 显然,“热固定技术”大大改善了 Ti 扩散铌酸锂光波导的稳定性.

## 4 讨论

1) 本文所用的“热固定技术”类似于文献[7]中所报道的全息光栅“热固定技术”. 这是因为在通光的情况下,从  $\text{Fe}^{++}$  这类杂质中心放出的电子沿晶体光轴  $+Z$  方向运动. 当晶体同时被加热到适当温度时,晶体中存在的缺陷和离子将产生热运动,正离子与光离化的电子相结合,使光离化产生的电子被固定在空间某些地方,形成相当稳定的结构,在正常工作温度下,不再出现离化现象. 将已作“热固定”处理的样品加热到更高温度,使正离子运动加剧,破坏了热固定温度下形成的正离子-电子对这一稳定结构,一定数量的电子又返回到  $\text{Fe}^{++}$  离子上去,所以器件又再次呈现出特性漂移.

2) 文献[8]认为,在“热固定”过程中起重要作用的是铌酸锂晶体中容易发生热运动的  $\text{H}^+$  离子,而文献[7]指出,要使“热固定”效果明显,在铌酸锂晶体中应包含比  $\text{Fe}^{++}$  离子这类中心数更多的正离子,以便去“固定”从  $\text{Fe}^{++}$  离子光离化放出的电子.

本文将 Ti 扩散条形波导构成的马赫-陈德尔干涉器作了如下实验:先测得其特性漂移如图 4(a)曲线所示,经过“热固定”处理后,测得的特性漂移如图 4(b)所示,表明波导的光致折

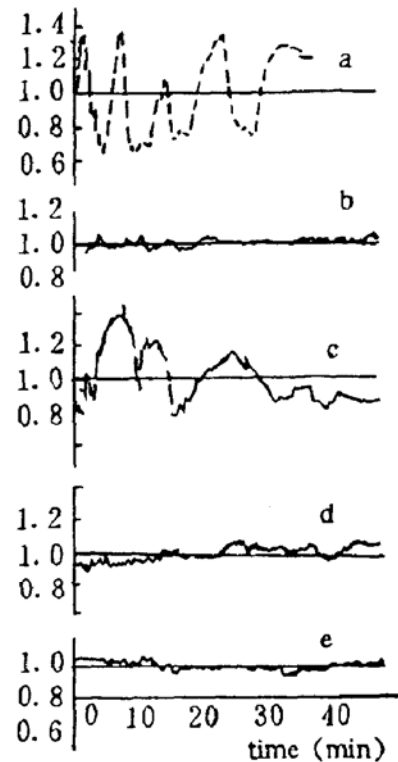


Fig. 3 Experimentally measured output optical power drift of Mach-Zehnder interferometer

变效应基本消除;将该样品放在苯甲酸融体中进行  $H^+$  离子交换,控制交换温度和时间,使铌酸锂表面的质子交换层厚度还足以形成质子交换波导,经质子交换的马赫-陈德尔干涉器的特性漂移测试结果如图 4(c)所示,表明波导出现了严重的不稳定性,本文将这一呈现严重不稳定性的质子交换钛扩散马赫-陈德尔干涉器进行前面所述的“热固定”处理,即使把“热固定”温度、时间作了大范围的变动,均得不到纯 Ti 扩散波导的那类满意的“热固定”效果,而表现出了极其严重的不稳定性,测试结果如图 4(d)所示。

如果  $H^+$  离子在 Ti 扩散铌酸锂光波导的“热固定”过程中起主要作用的话,那么绝不会得到图 4(d)曲线所示的严重的不稳定性,因此,本文实验说明在光波导特性的“热固定”过程中,并不是文献[8]所主张的  $H^+$  离子在起主要作用,而是其它易动的正离子在起作用。

3) 为了取得良好的“热固定”效果,在进行“热固定”时,最好采用比器件工作波长更短波长的激光束,耦合入波导中的光功率应尽可能高,以便使绝大部分光离化中心释放出电子,使这些电子被晶体中易动离子固定下来,关于易动离子的类型以及如何形成这些在“热固定”中发挥作用的易动离子,有待作更微观的理论分析研究

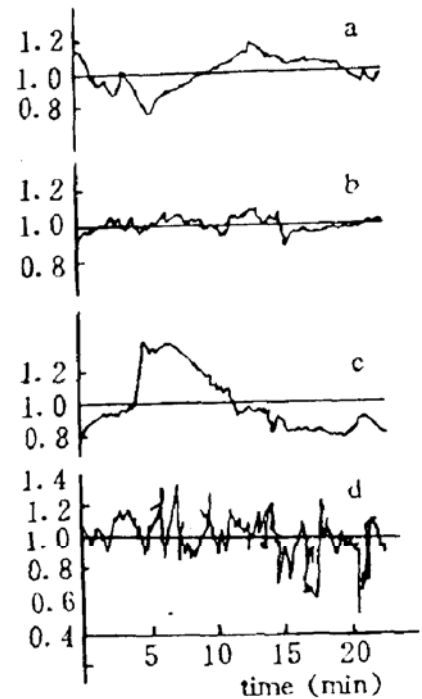


Fig. 4 Output drift of Ti-diffused waveguide Mach-Zehnder interferometer after proton-exchanged processing

## 参 考 文 献

- [1] R. A. Becker, Methods of Characterizing photorefractive Susceptibility of  $LiNbO_3$  waveguides. *Proc. SPIE*, 1985, **578**; *Integrated Optical Circuit Engineering II*: 12~18
- [2] G. E. Betts, L. M. Johnson, Experimental Evaluation of Drift and Nonlinearities in Lithium Niobate Interferometric Modulators. *Proc. SPIE*, 1987, **835**; *Integrated Optical Circuit Engineering V*: 152~160.
- [3] Peter G. Kazansky, Photoinduced conversion of radiation polarization in integrated optics components based on  $LiNbO_3$ . *IEEE. J. Q. E.*, 1989, **25**(4): 736~741
- [4] T. Fujiwara, S. Sato, H. Mori, Y. Fujii, Suppression of Crosstalk Drift in Ti:  $LiNbO_3$  Waveguide Switches. *IEEE. J. of Lightwave Technology*, 1988, **6**(6): 905~915
- [5] 陈铮, 沟道波导模截止调制器中的光损伤. *光学学报*, 1985, **5**(5): 452~454.
- [6] N. A. Sanford, W. C. Robinson, Optical Damage Effects in Z-Propagating  $LiNbO_3$  Channel Waveguides Fabricated on X-and Y-cut Substrates. *Proc. SPIE*, 1986, **1704**; *Integrated Optical Circuit Engineering IV*: 58~61.
- [7] D. L. Staebler, J. J. Amodi, Thermally Fixed Holograms in  $LiNbO_3$ . *Ferroelectrics*, 1972, **3**: 107~113
- [8] R. A. Becker, Thermal Fixing of Ti-Indiffused  $LiNbO_3$  Channel Waveguides for Reduced Photorefractive Susceptibility. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(2): 121~123
- [9] Alfredo Yi Yan, Index Instabilities in Proton-Exchanged  $LiNbO_3$  Waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **42**(8): 633~635

## Thermal fixing technique of Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> waveguide characteristics

CHEN Zheng      WAN Jingchun

*(Department University of Electronic Science and Technology,  
of Opto-Electronics Technology, Chengdu 610054)*

(Received 2 December 1991)

### Abstract

There is a characteristics drift caused by the photorefractive effect in Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> waveguides. The drift will result in severe problems to the devices in practical use, especially to that based on optical coherence principles. Experimental results about thermal fixing technique of waveguide characteristics are presented in this paper. It is derived from our experiment that H<sup>+</sup> ions do not play an important role in thermal fixing processing.

**Key words** Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> waveguides, thermal fixing technique.