

# 铌酸锂平面光波导在氦氛激光下的光损伤特性

章吉良 许政权 陈益新  
(上海交通大学应用物理系)

## 提 要

本研究测量了各种  $\text{LiNbO}_3$  波导  $m$  线光强分布轮廓随时间的变化。结果表明,由陈益新等提出的电场增强硝酸银盐浴法和由贝尔实验室报道的苯甲酸盐浴法制备的离子迁移波导具有较高的抗光损伤能力。当发生光损伤时,这种波导由于平面内散射引起的传输光束的角宽可达  $40^\circ$  左右。

关于波导制备方法与波导抗光损伤能力的关系:(1)如果能使波导中原有金属杂质离子的氧化态更趋稳定,也就是提高  $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$ (或  $\text{Cu}^{++}/\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{++}/\text{Mn}^+$ ) 比值,那么这种方法制备的波导的抗光损伤能力就高。(2)如果在波导制作过程中,容易被杂质特别是铁离子沾染的,波导的抗光损伤能力就低。(3)在高的操作温度下(特别是接近居里点时)会发生相变,因而抗光损伤能力就低。

铌酸锂平面光波导是制作集成光学器件的基础。但是光损伤问题严重地影响了铌酸锂波导器件在中等或更高的激光功率下的使用。因此弄清铌酸锂波导光损伤现象及其机理,提高波导抗光损伤的能力;或者有意加强光损伤以利用它作为全息记忆等用途,确是一个具有很大实际意义的问题。

国外对  $\text{LiNbO}_3$  光波导光损伤的研究是在 70 年代开始报道的。目前对  $\text{LiNbO}_3$  波导光损伤的研究方法主要有全息技术<sup>[1]</sup>和  $m$  线光强分布轮廓法(以下简称为  $m$  线法)<sup>[2,3]</sup>。全息技术可以定量得出波导光损伤灵敏度,并且有希望成为波导全息记忆技术,但对于观察波导光损伤的全过程则是困难的。美国 R. L. Holman 等人定性地观察了波导光损伤时  $m$  线光强分布轮廓的变化,并比较了各种方法制备的波导稳态输出与输入功率的关系<sup>[3]</sup>。目前这是比较有效的方法。国内对  $\text{LiNbO}_3$  波导光损伤问题的研究尚未见报道。本文采用  $m$  线法观察和研究了各种方法制备的  $\text{LiNbO}_3$  平面光波导在 He-Ne 激光下的光损伤特性,在 R. L. Holman 的基础上,对实验装置作了进一步的改进。

## 一、实 验

用  $m$  线法观察和测量波导光损伤的基本原理是:当激光束经棱镜耦合到波导后,由于光损伤造成波导内传播区域的折射率变化,使波导平面内散射<sup>[4]</sup>增强,从而  $m$  线光强分布轮廓改变,从输出棱镜耦合出来的中心光斑沿  $m$  线的散射加强,导致  $m$  线中心主峰强度衰减及平面内散射角加宽。

实验装置如图 1 所示。带有狭缝的光电倍增管在同步马达带动下沿  $m$  线扫描。在测

量中使用了具有高信噪比和灵敏度的锁相放大器,并经对数放大器处理,能直接读出输出衰减的分贝数。全套设备安装在防震的 2.5 米平台上。这种方法具有快速、准确、稳定、定量的优点。

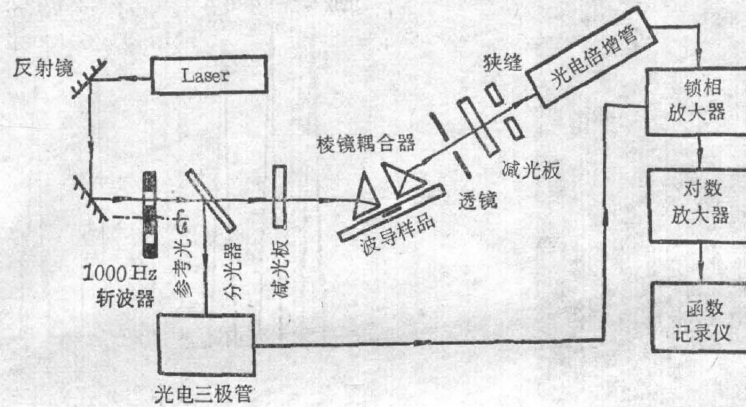
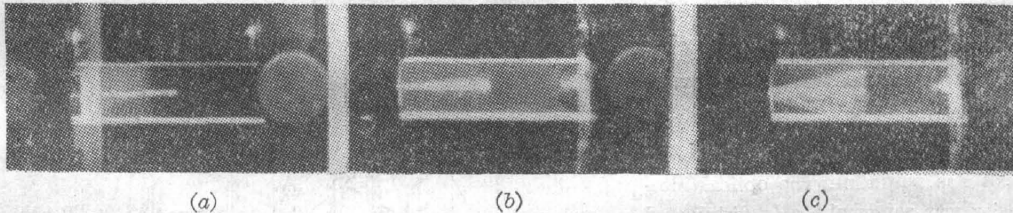


图 1 测量波导光损伤实验装置示意图

Fig. 1 Apparatus for measurement of optical damage in waveguides



(a)

(b)

(c)

图 2 3# 波导光损伤时传输线角宽增大

Fig. 2 When optical damage arises in 3# waveguide, the angular width of propagating beam gradually broadenes

- (a) Original propagating beam is nearly parallel;
- (b) At the beginning of optical damage, the angular width was broadened. In this Fig. the angular breadth reached to 15°;
- (c) When optical damage tends toward a steady state, the angular width reached to 40°

表 1 激光功率和曝光时间

Table 1 Laser power and exposing time

样品号	制备方法	激光功率(mW)/功率密度(W/cm <sup>2</sup> )	曝光时间(分)
1	大气氛中扩钛	4.5/130	80
2	闭管法扩钛(抑制 Li <sub>2</sub> O 外扩)	4.5/130	96
3	湿氧氛中扩钛(氧纯度 90%)	2.0/60	8
4	增强电场 AgNO <sub>3</sub> 盐浴法	20.0/480 40.0/960	300 300
5	苯甲酸盐浴法	40.0/2500	330

图 2 是典型损伤的 3# 波导在  $0.5 \text{ mW}$  ( $15 \text{ W/cm}^2$ ) He-Ne 光下损伤时传输线角宽增大的照片,图 3 是与之对应的  $m$  线照片。由图 2 可知,在未损伤时的传输线是接近平行的,发

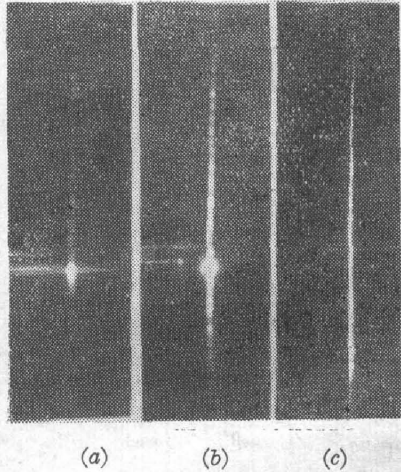


图 3 3# 波导光损伤时  $m$  线变化  
(上部为晶体的  $-C$  方向)

Fig. 3 Varying of the  $m$  line, when optical damage arises in 3# waveguide (the upper is  $-C$  direction)

- (a) The original  $m$  line, The center beam spot was powerful. The optical intensity was asymmetrically distributed along  $m$  line [corresponding to Fig. 2 (a)];
- (b) At the beginning of optical damage, the center optical intensity scattered to  $-C$  direction [corresponding to Fig. 2 (b)];
- (c) When optical damage trended toward a steady state, the center optical intensity scattered to  $-C$  direction fully. [Corresponding Fig. 2 (c)]

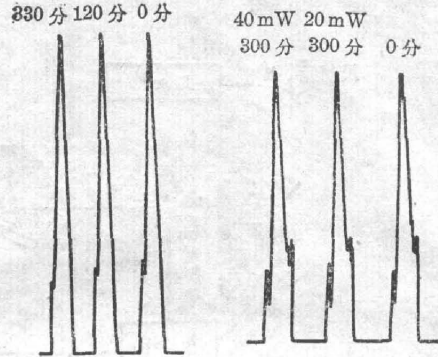


图 4 4#、5#  $m$  线中心光强分布轮廓不变

Fig. 4 Profiles of the center intensity along  $m$  line of 4#, 5# waveguides did not vary

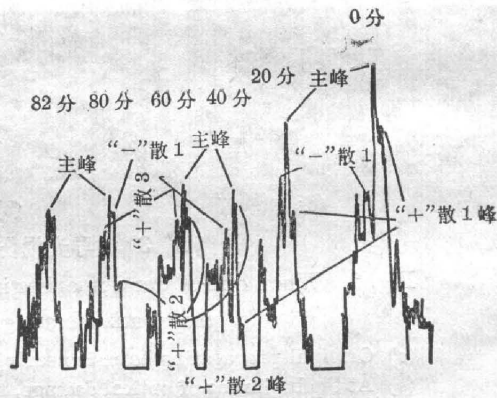


图 5 1#  $m$  线中心光强分布轮廓变化

Fig. 5 Varying of the profile of the center intensity along  $m$  line of 1# waveguide

生光损伤时,这种波导由于平面内散射引起的传输光束的角宽可达  $40^\circ$  左右;也明显可见光损伤时中心光斑光强沿  $m$  线向晶体的  $-C$  方向散射。

各类样品  $m$  线中心光强分布轮廓随时间变化所用的实验功率和曝光时间如表 1 所示。

实验指出,4#、5# 波导曝光后, $m$  线中心光强分布轮廓没有变化(见图 4)。这说明根据陈益新等提出的电场增强硝酸银盐浴法<sup>[5]</sup>和贝尔实验室报道的苯甲酸盐浴法制备的离子迁移波导具有很好的抗光损伤能力,它们即使在  $40 \text{ mW}$  ( $1 \text{ kW/cm}^2$ ) 的 He-Ne 光下工作 5 小时以上也不发生光损伤。

图 5、6、7、分别是 1#、2#、3# 波导光损伤时  $m$  线中心光强分布轮廓随时间的变化。实验表明,扩钛波导抗光损伤能力较离子迁移波导差。其中闭管法制备的 2# 波导在  $4.5 \text{ mW}$  ( $130 \text{ W/cm}^2$ ) He-Ne 光下工作 80 分钟左右已进入光损伤稳态, $m$  线中心主峰强度衰减达

14 dB; 而大气氛中扩钛的 1\* 波导还要差一些, 在 4.5 mW (130 W/cm<sup>2</sup>) He-Ne 光下工作 40 分钟左右就进入光损伤稳态, *m* 线中心主峰强度衰减达 18 dB; 而在不纯的湿氧气氛中扩散钛的 3\* 波导则极易损伤, 即使在 2 mW (60 W/cm<sup>2</sup>) He-Ne 光下, 只要工作 5 分钟左右就进入光损伤的稳态, *m* 线中心主峰强度衰减高达 32 dB。此外还对 2\* 波导测量了停止曝光后 22 小时的 *m* 线中心光强分布轮廓, 表明光损伤确已自动恢复。

为了进一步研究波导的光损伤过程, 有必要研究: (i) 波导 *m* 线中心主峰强度衰减与时间的关系。取曝光前(0分)的主峰强度为 0 分贝, 作出主峰强度衰减与时间的关系图(如图 8 所示)。(ii) 研究波导平面内散射角(距主峰 -20 dB 处的半角宽度)相对增宽与时间的关系。取曝光前的散射角宽为 100%, 作出散射角相对增宽与时间的关系图(如图 9 所示)。

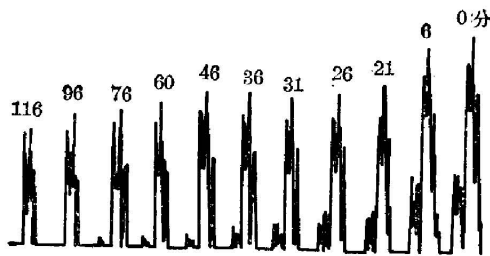


图 6 2\* *m* 线中心光强分布轮廓变化  
Fig. 6 Varying of the profile of the center intensity along *m* line of 2\* waveguide

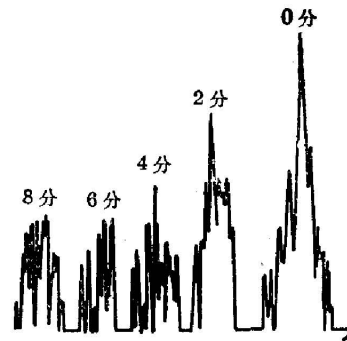


图 7 3\* *m* 线中心光强分布轮廓变化  
Fig. 7 Varying of the profile of the center intensity along *m* line of 3\* waveguide

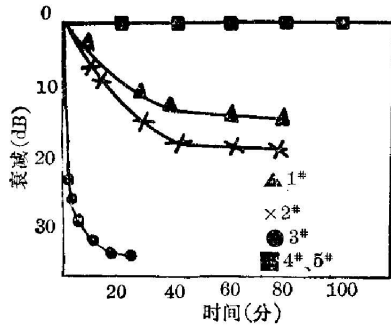


图 8 主峰强度衰减与时间关系  
Fig. 8 Time-dependence of the drop of the main peak of *m* line

(by ion-migration; ▲ by Ti-in-diffusion in close crucible; × by Ti-in-diffusion in atmosphere; ● by Ti-in-diffusion in wet Oxygen)

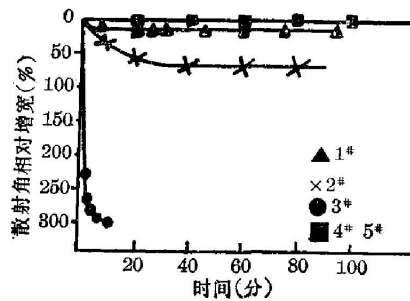


图 9 散射角相对增宽与时间关系  
Fig. 9 Time-dependence of the relative broadening of scattering angle

## 二、分析和讨论

### 1. 光损伤的弛豫特性:

按照 F. S. Chen 的理论计算<sup>[6]</sup>, 在曝光初始阶段, 折射率变化是与辐照能流密度(W/

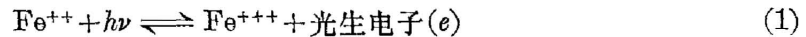
$\text{cm}^2$ ) 以及曝光时间成正比的。根据光线传播定理:  $|\mathbf{k}| = \frac{1}{\rho} = \nu \cdot \text{grad} \log n = \nu \cdot \frac{1}{n} \text{grad} n^{[7]}$ , 光线偏向  $\left(\frac{1}{\rho}\right)$  与折射率梯度成正比。因此折射率变化引起的波导平面内散射角的相对增宽在曝光初始阶段与辐照能流密度及曝光时间成正比; 而由散射引起的  $m$  线中心主峰强度衰减也是如此。这与图 8, 图 9 所绘曲线在曝光初始阶段的线性形状相符。

当辐照继续下去, 更多的施主性陷阱被电离, 因而受主性陷阱的密度增大, 被俘获的速率增大。当再俘获成为主要机构时, 折射率的变化减缓, 并逐渐趋于一个稳定值。因此长时间的曝光, 将使波导平面内散射角的相对增宽及  $m$  线中心主峰强度衰减逐渐减缓, 最后趋于一个稳定值, 这也与图 8、图 9 相符。

## 2. 波导制备方法与抗光损伤能力的关系:

本实验证实, 由同样的  $\text{LiNbO}_3$  晶体通过不同方法制备的平面光波导, 其抗光损伤能力有着明显的区别。其原因有以下三方面:

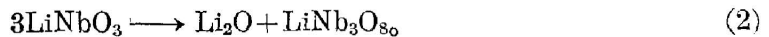
(a) 理论计算表明<sup>[1]</sup>, 当  $\text{LiNbO}_3$  中含有  $10^{-3}$  ppm 的  $\text{Fe}^{++}$  杂质离子时, 光折变灵敏度的理论和实验值已相符, 而一般的  $\text{LiNbO}_3$  晶体中往往含有  $1 \sim 10$  ppm 的  $\text{Fe}$  杂质, 因此可认为  $\text{LiNbO}_3$  中所含有的低价(还原态)金属杂质离子特别是  $\text{Fe}^{++}$  是构成施主性电子陷阱的主要因素。通过下述反应:



产生光生电子。其逆反应是重新俘获电子的原因之一, 也是光损伤退除的主要原因。此外,  $\text{Cu}^+$ 、 $\text{Mn}^{++}$  等杂质离子, 通过  $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Cu}^{++}$ 、 $\text{Mn}^{++} \rightarrow \text{Mn}^{+++}$  反应, 也是光损伤的原因。注意到(1)式左端的铁离子是低价的, 处于还原态; 而右端的铁离子是高价, 处于氧化态。由此可见, 在波导制备过程中, 假如能使低价金属离子氧化为高价离子, 从而提高  $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$  (或  $\text{Cu}^{++}/\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{+++}/\text{Mn}^{++}$ ) 比值, 那么波导的抗光损伤能力将提高; 反之, 就降低<sup>[1, 8~10]</sup>。

(b) 在波导制备过程中, 如果容易混入杂质, 特别是低价金属杂质离子, 那么就降低波导的抗光损伤能力。

(c) 在  $850^\circ\text{C}$  左右,  $\text{LiNbO}_3$  是不稳定的, 发生下述相变<sup>[11]</sup>:



$\text{LiNb}_3\text{O}_8$  是单斜晶体, 有 2.28, 2.36, 2.40 三个折射率, 而  $\text{LiNbO}_3$  只有 2.2 和 2.3 两个折射率, 两者有明显的区别, 因此在超过  $850^\circ\text{C}$  的温度下制备波导, 就会发生局部相变, 造成新的晶体缺陷, 降低波导的抗光损伤能力。

以下就这三方面对实验样品作些简单分析:

电场增强  $\text{AgNO}_3$  盐浴法和苯甲酸盐浴法, 其波导形成的主要机理是  $\text{Li}^+$  离子的外扩,  $\text{Li}^+$  外扩虽造成晶体内电荷的失配, 但由于电场的作用 ( $\text{AgNO}_3$  盐浴法) 或者  $\text{H}^+$  的内扩 (苯甲酸盐浴法), 又重新得到电荷补偿, 因此最终不影响晶体内原有金属杂质离子的价状态, 即不改变  $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$  等的比值, 不影响波导抗光损伤能力。此外, 这两种方法都是在低于  $300^\circ\text{C}$  的温度下进行的, 既不容易混入杂质, 也不会发生相变。因此, 从提高波导抗光损伤能力的观点来看, 低温下的离子迁移法具有明显的优越性。

钛扩散是在  $1000^\circ\text{C}$  的高温下进行的, 很可能造成一种特定的还原条件<sup>[9]</sup>, 使部分  $\text{Fe}^{+++}$  还原成  $\text{Fe}^{++}$ , 降低  $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$  比值, 从而使波导抗光损伤能力降低。此外, 由于升降温时

都经过 850°C, 因此引起晶体局部相变, 造成新的缺陷, 降低抗光损伤能力。因此钛扩散波导的抗光损伤能力就显著地比离子迁移波导差。

同样的钛扩散, 但由于工艺条件不同, 其抗光损能力也是有差别的。其原因可能是: 闭管法扩钛工艺是在充满  $\text{Li}_2\text{O}$  的封闭坩埚中进行钛扩散的, 因此既抑制了  $\text{Li}_2\text{O}$  的外扩, 又避免其它金属杂质离子的混入; 大气氛中扩钛较容易混入杂质; 而氧气氛中扩钛, 由于氧的纯度仅 90%, 其中含有较多杂, 在高温下极易混入波导层。而且 1000°C 的氧气氛所造成的还原条件更强烈,  $\text{Fe}^{+++}$  更容易还原成  $\text{Fe}^{++}$ 。因此, 同样的扩钛工艺, 氧气氛扩钛波导的抗光损伤能力最差, 大气氛中扩钛波导次之, 而闭管法扩钛波导较好些。

### 三、结 论

用锁相放大器配以对数放大器监测激光照射下波导  $m$  线中心光强分布轮廓变化, 以观察和研究光损伤, 具有快速、准确、稳定、定量的优点。

实验结果表明, 光损伤是一种弛豫过程, 在一定功率激光照射下,  $m$  线中心主峰强度衰减和平面内散射角相对增宽经过一定时间将进入稳态; 损伤时波导的输出光斑中心光强沿  $m$  线主要向晶体的  $-O$  方向散射; 光损伤经相当长时间(几十小时或更长)能自动退除。从而证实了 F. S. Chen 关于  $\text{LiNbO}_3$  光损伤机理模型的合理性。

波导的抗光损伤能力与制备方法密切相关。在制备过程中, 假如能使低价(还原态)的金属杂质离子氧化为高价离子, 从而提高  $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$ (或  $\text{Cu}^{++}/\text{Cu}^+$ 、 $\text{Mn}^{+++}/\text{Mn}^{++}$ ) 比值, 那么波导的抗光损伤能力就将提高; 反之, 就降低。此外, 低温下制作波导, 既不容易混入杂质, 也不会发生晶体相变而造成新的缺陷。因此, 从提高波导抗光损能力的观点来看, 低温离子迁移法具有明显的优越性。

### 参 考 文 献

- [1] A. M. Glass; *Opt. Eng.*; 1978, **17**, No. 5 (Ser-Oct), 470.
- [2] G. L. Tangonan, M. K. Barnoski; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**, No. 6 (Mar), 233.
- [3] R. L. Holman, P. J. Cressman; *Ferroelectrics*, 1980, **27**, 77.
- [4] David W. Vahcy; *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, (1979, Washington, U. S. A.), **176**, (Apr), 62.
- [5] Y. X. Chen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**, No. 1 (Jan), 10.
- [6] F. S. Chen; *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**, No. 8 (Jul), 3389.
- [7] M. 玻恩, E. 沃耳夫; *《光学原理》中译本*, (科学出版社, 1978), 168.
- [8] A. M. Glass, I. P. Kaminow; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 2 (Jan), 276.
- [9] R. L. Holman, P. J. Cressman *et al.*; *Third International Conference on Integrated and Guided-Wave Optics*, (1982, January, Pacific Grove, California), Technical Digest FA 4.
- [10] J. L. Jackel *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**, No. 7 (Jul), 4855.
- [11] C. K. Carniglia; *Opt. Eng.*, 1979, **18**, No. 2 (Mar~Apr), 104.

## Properties of optical damage in $\text{LiNbO}_3$ planar waveguides at 632.8 nm

ZHANG JILIANG XU ZHENGQUAN AND CHEN YIXIN

(*Shanghai Jiao Tong University*)

(Received 25 May 1983; revised 31 August 1983)

### Abstract

Time-dependences of the beam intensity profile along the  $m$  lines of different waveguides which prepared by use of various methods were measured. The result demonstrated that the waveguides by ion migration had higher resistance ability of optical damage. These waveguides were prepared by use of the salt bath method in  $\text{AgNO}_3$  by applying electrical field proposed by Y. X. Chen et al. and the  $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$  melt bath method of Bell Lab. When optical damage arises, the angular width of propagating beam in this waveguide which produced by in-plane scattering could reach to  $40^\circ$ . In regard to the relation between the method of formation of the waveguide and its resistance ability of optical damage, author proposes that when one method makes oxidized state of impurities ions tend to more stable, in other words, increasing  $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$  (or  $\text{Cu}^{++}/\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ) ratio, the resistance ability of optical damage of the waveguide prepared by such method is higher. Otherwise, when waveguides are easy contaminated by impurities in preparation process, the resistance ability of optical damage is lower. In addition at high operation temperature (specially close Curie point) the transformation could take place, thus the resistance ability of optical damage is lower.