

# LiNbO<sub>3</sub> 条波导的光损伤\*

赵薇

(长沙铁道学院数力系, 长沙 410075)

王葵如 余国贤

(北京邮电学院, 北京 100088)

**提要** 报道了利用 CCD 测试 LiNbO<sub>3</sub> 条波导光损伤的实验结果。发现各种传向都存在不同程度的光损伤。加热可大部分消除光损伤, 掺入 MgO 也可提高条波导的抗光损伤性能。

**关键词** CCD, 铌酸锂, 条波导, 光损伤

## 1 引言

LiNbO<sub>3</sub> 光波导在短波长的强光照下, 易发生光损伤现象, 导致器件性能恶化, 造成一系列严重后果。对此问题的研究早在 60 年代就已经展开。贝尔实验室的 F. S. Chen 于 1969 年首次提出光生电子的理论模型<sup>[1]</sup>, 以后, 人们又对各种方式制作的波导进行了抗光损伤性能的研究<sup>[2~4]</sup>; 后来, 又发现在 LiNbO<sub>3</sub> 中掺入 MgO 具有更好的抗光损伤性<sup>[5~9]</sup>。但是, 这些研究多限于平板波导。

本文主要讨论了钛扩散条波导的抗光损伤能力。钛波导条通过扩散分别制在 LiNbO<sub>3</sub> 和 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 衬底上(其中 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 中含 MgO 0.05 mol, 由南开大学提供)。为了研究其光损伤情况, 分别使用了 He-Ne( $\lambda = 0.6328$  nm, 功率为 10 mW)激光器和 He-Cd( $\lambda = 0.4416$  nm, 功率为 70 mW)激光器进行照射, 在光功率相同、照射时间相同、波长相同的情况下, 对不同材料、不同传向的条波导的抗光损伤能力进行了比较分析, 发现传向、波长、光功率、材料、制作工艺等均对抗光损伤能力有不同程度的影响。

## 2 实验原理及现象

### 2.1 实验装置及原理

在实验中所使用的钛扩散条波导的钛膜厚度为 0.85  $\mu\text{m}$ , 条宽为 6  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$ , 所用的 CCD 是 256 元线阵摄像器件, 其光敏元为一横向放置的 10 $\times$ 20  $\mu\text{m}^2$  的区域。

实验装置及光路图如图 1 所示。图中透镜  $L_1, L_2$  的作用是将激光束会聚成小于条波导横截面的光束, 提高端面入射的耦合效率, 将光场有效地集中在条波导内形成导波。而透镜  $L_3$  的作用是为了将条波导出射端面上的光场分布成像在 CCD 光敏元上, 经 CCD 处理后转换成电

\* 国家自然科学基金资助项目。

信号,输入给示波器。这样,通过透镜  $L_1, L_2$  和  $L_3$  的综合作用就可以有效地减小基片中辐射光场对测试波形的影响。一般地,对于多模波导对应的波形应多于一个峰值。当入射光照射在条波导上以后,随时间的延长,波导中可能有光损伤发生,相应地在示波器上的波形会出现变化。利用 CCD 测试光损伤的优点是:操作简便,形象直观并可随时观察-记录光损伤随时间的变化。

## 2.2 实验结果

### 2.2.1 传向对光损伤的影响

通过实验发现,不同传向的条波导抗光损伤能力不同。一般地沿  $z$  向传播的条波导抗光损伤性能优于  $x, y$  传向的。我们对  $x$  切  $z$  传,  $y$  切  $z$  传及  $x$  传,  $y$  传的条波导,分别使用 He-Ne 激光器及 He-Cd 激光器进行测试,结果列于表 1,如图 2、图 3 所示。

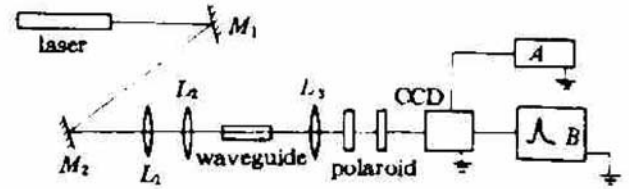


Fig. 1 Experimental arrangement for optical damage probe

$M_1, M_2$ : reflective mirror;  $L$ : convex lens;

A: DC. voltage Regulator; B: oscilloscope

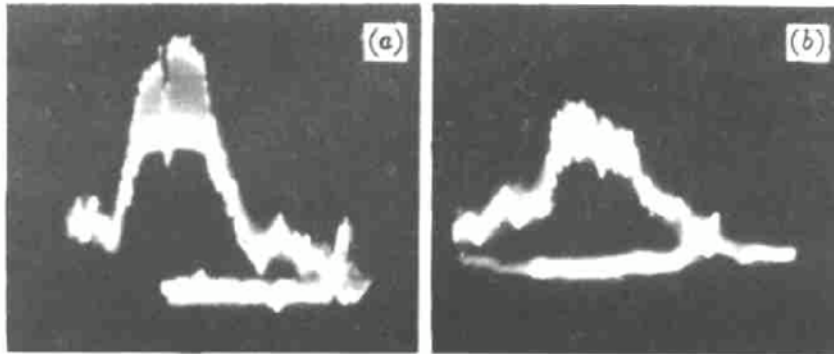


Fig. 2 The waveform of a  $y$ - $z$  channel waveguide before heating

(a)  $t = 0$ ; (b)  $t = 4.5$  h

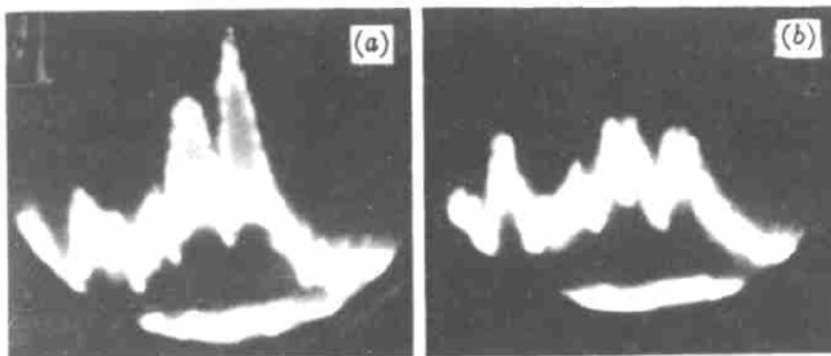


Fig. 3 The waveform of a  $x$ - $y$  channel waveguide before heating

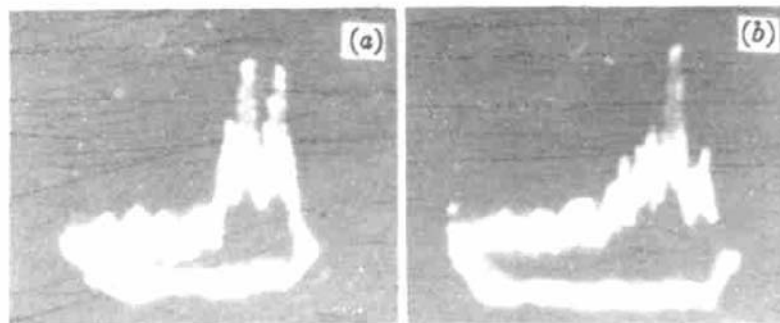
(a)  $t = 0$ ; (b)  $t = 2.8$  h

### 2.2.2 加热对消除光损伤的影响

在已存在光损伤的条波导中,存在一个复原问题。实验表明:已出现光损伤的条波导在室温下放置一年后仍有较明显的光损伤。若将其置于  $200\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱内加热 2 h,再自然冷却 24 h 后进行观察,发现光损伤已大部分得到消除。如图 3 (b) 与图 4 (a),但其抗光损伤性能有所下降,在相同条件下,出现光损伤的时间普遍提前(如表 1)。从实验数据可以看出,加热可以加快消除光损伤,但恢复后的条波导抗光损伤性能下降。

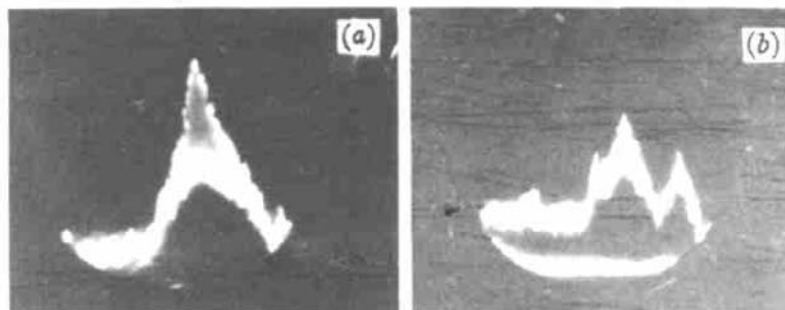
Table 1 The time of optical damage was found in different channel waveguides

Waveguide	Light source	The time of optical damage was found		
		without heating	with heating	
<i>y-z</i> (LN)	He-Ne (632.8 nm, 10 mW)	4.5 h	4.25 h	Fig. 2
<i>x-z</i> (LN)	He-Ne (632.8 nm, 10 mW)	4.5 h	3.5 h	
<i>x-y</i> (LN)	He-Ne (632.8 nm, 10 mW)	2.8 h	2.25 h	Fig3, Fig. 4
<i>y-x</i> (LN)	He-Ne (632.8 nm, 10 mW)	3 h	1.5 h	
<i>z-y</i> (LN)	He-Ne (632.8 nm, 10 mW)	3.5 h	3 h	
<i>z-y</i> (MgO : LN)	He-Ne (632.8 nm, 10 mW)	5 h	4.6 h	Fig. 5
<i>x-z</i> (LN)	He-Cd (441.6 nm, 75 mW)	2.7 h		
<i>z-y</i> (LN)	He-Cd (441.6 nm, 75 mW)	0.5 h		
<i>y-x</i> (LN)	He-Cd (441.6 nm, 75 mW)	0.9 h		

Fig. 4 The waveform of a *x-y* channel waveguide after heating(a)  $t = 0$ ; (b)  $t = 2.25$  h

### 2.2.3 掺 MgO 的 $\text{LiNbO}_3$ 条波导的抗光损伤性

我们对掺 MgO 0.05 mol 的  $z$  切  $y$  传的钛扩散条波导进行测试,观察到在 He-Ne 光源照射下,2.5 h 波形出现轻微变化,在随后的 1.5 h 中,波形不稳定,但可以基本复原,在 5 h 左右时波形发生突变,且不再复原,说明已出现光损伤,如图 5。加热以后可以消除大部分光损伤。用 He-Cd 光源进行照射,1 h 30 min 仍没有明显的光损伤出现。可认为掺入 MgO 后的  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  条波导的抗光损伤性能有所提高。但应指出,掺 MgO 的条波导出现光损伤后,光斑发散比不掺 MgO 的要严重,且通光性也较差。

Fig. 5 The waveform of a MgO :  $\text{LiNbO}_3$  channel waveguide(a)  $t = 0$ ; (b)  $t = 5.25$  h

### 2.2.4 照射光的波长、功率对光损伤的影响

在实验中,分别使用了 He-Ne 及 He-Cd 激光器作光源,照射各种不同的条波导,发现用短波长、大功率的光照射,条波导较易出现光损伤,而用较长波长、较小功率的光照射,条波导

有较强的抗光损伤能力。与 F. S. Chen<sup>[1]</sup> 的报道相符。因而,就条波导而言,用长波长、小功率的光进行照射,可以较好地解决光损伤问题,提高器件的稳定性。

### 2.2.5 制作工艺对条波导光损伤的影响

在 He-Cd 激光照射中,钛扩散的  $x$  传条波导 55 min 左右就出现明显的光损伤,而同样条件下,离子交换的条波导则在 1 h 40 min 时仍没有出现明显的光损伤。说明离子交换条波导较钛扩散条波导的抗光损伤能力强。

## 3 结果分析及讨论

贝尔实验室 F. S. Chen 提出了一种理论模型,认为光损伤是由光照射在晶体中,产生一种光生电子沿  $z$  轴运动,诱发一静电场,通过光电效应导致折射率的变化,从而产生光损伤现象。根据此论点,可以解释实验现象。

在实验中,我们发现不同传向的抗光损伤能力不同, $z$  传的抗光损伤能力要明显优于  $x$  传, $y$  传,但仍然存在有光损伤。根据光生电子理论,在光照下诱发电场  $E_z$ ,使 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的非常折射率发生改变  $\Delta n_e (= n_e^3 \gamma_{33} E_z / 2)$ ,寻常折射率改变为  $\Delta n_o (= n_o^3 \gamma_{13} E_z / 2)$ 。因为  $\gamma_{13} < \gamma_{33}$ ,所以,  $\Delta n_e > \Delta n_o$ ,在 TM 模中, $x$  切  $z$  传、 $y$  切  $z$  传及  $x$  切  $y$  传, $y$  切  $x$  传对应的为  $n_o$ , $z$  切  $y$  传与  $z$  切  $x$  传对应于  $n_e$ ,理论上除了  $z$  切  $y$  传和  $z$  切  $x$  传的光损伤较严重外,其他的光损伤应无太大差异。但是,应该注意到诱发电场  $E_z$  的强弱与光生电子分离的距离有关,距离小者  $E_z$  较强,大者则较弱。在传光方向垂直于  $z$  轴( $y$  传, $x$  传)的情况下,电荷分离受到条波导宽度  $d$  及厚度  $h$  的限制,在沿  $z$  轴传输时,则受到波导长度  $L$  的限制。在条波导中, $L$  是 mm 数量级,而  $d, h$  均为  $\mu\text{m}$  的数量级,故  $L \gg d, h$ ,因此,在沿  $z$  轴传输中,应该说  $E_z$  的作用很小,几乎观察不到光损伤。在实验中,我们观察到  $z$  传仍存在有光损伤,但比  $y, x$  传要轻,这一点不同于平板波导。根据光生电子理论,产生这种现象可能与下列因素有关: 1) 在抛光,光刻等工艺过程中,由于各种原因,使得条波导不是严格平行于  $z$  轴,这样在波导两侧有极少量的电荷积累,形成不可忽略的  $E_z$ ,导致光损伤现象; 2) 条波导边界的不规整,也会出现电荷积累,产生  $E_z$ ,使  $\Delta n_o$  不可忽略,出现光损伤,这是在平板波导中所没有的。

由于光损伤是光生电子形成电场而引起的,那么去掉光照后应有复原的可能。我们认为光生电子实际上是获得光子的能量后才脱离束缚,在光照区中沿一定方向运动,经不断地俘获,激发直至到光照区的边缘,形成一附加电场,产生光损伤。在光照去掉之后,这些电子由于所具有的能量不同,因而,不可能完全恢复原来状态。加热可以加快这一过程。但仍有一小部分光生电子不能获得足够的能量回到原区内。这样,再次进行光照时,这些电子会很快获得足够的能量到达光照区外围,形成附加电场,导致光损伤的出现。这也是出现光损伤的条波导复原后,再次光照更易发生光损伤的原因。

实验中,为了更科学地说明波形变化是由于光损伤引起的,在每次观察的同时也监测了光功率。在光功率不变的情况下。发现各种条波导都存在着一种现象,即在光照开始的一段不长的时间内,输出波形不稳定,在较小范围内波动,持续时间不长,稳定后,再经较长时间的照射,波形出现较大的变化,即形成光损伤。我们认为在这一段不长的时间内,已出现了少量不稳定的光生电子,光照去掉后可以自己复原,若继续照射,则会形成持久的光损伤。这种现象在 He-Cd 激光照射下更明显。从能量的角度来看,晶体中少量动能较大束缚弱的电子在获得光子的

能量后,朝光照区外围移动,形成一微弱的附加光场,对晶体的内电场有一定的影响,并产生一很小的  $\Delta n$ ,从而表现为光场的微弱变化。由于这类电子数量不多,故在较短时间内,晶体内的光场仍能达到一稳定值,波形也就稳定下来。之后,再持续进行光照,将会产生大量的光生电子,即出现较强的附加电场,  $\Delta n$  的值相应也较大,从而形成持久性的光损伤。由于 He-Cd 激光的波长较短、能量较大,所以在它的照射下,上述现象也就更明显。

根据实验结果,采用以下方法可以减小条波导的光损伤。1) 在选择基片时,尽量选取抗光损伤能力较强的  $z$  传片子; 2) 在  $\text{LiNbO}_3$  中掺入一定量的  $\text{MgO}$ ,也可以提高条波导的抗光损伤能力; 3) 尽量使用长波长、小功率的光作为光源; 4) 在制作工艺上,离子交换比钛扩散的条波导抗光损伤性能好。另外,加热也可以消除大部分光损伤,但是经加热后的条波导抗光损伤能力下降,且波导的通光性能下降,使得器件损耗增大。因而,是否采用此方法消除光损伤还有待于进一步探讨。

### 参 考 文 献

- 1 F. S. Chen. Optically Induced Change of Refractive Indices in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$ . *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(8) : 3389~3396
- 2 J. Jackel, A. M. Glass, G. E. Peterson *et al.*. Damage-resistant  $\text{LiNbO}_3$  waveguides. *J. Appl. Phys.*, 1984, **55** (1) : 269~270
- 3 E. Glavas, P. D. Townsend, G. Droungas *et al.*. Optical Damage Resistance of Ion-implanted  $\text{LiNbO}_3$  Waveguides. *Electr. Lett.*, 1987, **23**(2) : 73~74
- 4 L. Zhang, P. J. Chandler, P. D. Townsend. Optical analysis of damage profiles in ion implanted  $\text{LiNbO}_3$ . *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, 1991, **B59/60** : 1147~1152
- 5 D. A. Bryan, Robert Gerson, H. E. Tomaschke. Increased optical damage resistance in Lithium niobate. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44** : 847
- 6 D. A. Bryan, R. R. Rice, Robert Gerson. Magnesium-doped Lithium niobate for higher optical power applications. *Opt. Eng.*, 1985, **24**(1) : 138
- 7 M. Digonnet, M. Fejer, R. Byer. Characterization of proton-exchanged waveguides in  $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$ . *Opt. Lett.*, 1984, **10**(5) : 235
- 8 C. N. Bulmer. Characteristics of Ti-indiffused waveguides in  $\text{MgO}$ -doped  $\text{LiNbO}_3$ . *Electr. Lett.*, 1984, **20**(22) : 902
- 9 许政权,程 宁. 掺  $\text{MgO}$  的  $\text{LiNbO}_3$  平面光波导的抗光损伤能力. *中国激光*, 1990, **17**(7) : 426~428

## Optical Damage of Lithium Niobate Channel Waveguide

Zhao Wei

(Changsha Railway University, Changsha 410075)

Wang Kuiru Yu Guoxian

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

**Abstract** The experimental observation of optical damage of channel waveguides on  $\text{LiNbO}_3$  substrate by CCD is reported. We found that optical damage was propagation direction dependent. The optical damage can be partly erased by heating the sample. The resistance against optical damage of  $\text{MgO}$  doped  $\text{LiNbO}_3$ , i. e.,  $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$ , is stronger than that of pure  $\text{LiNbO}_3$ .

**Key words** CCD, Lithium niobate, channel waveguide, optical damage