

全息法研究LN和Mg:LN晶体波导基片的光损伤

李铭华 赵业权 徐玉恒 刘彩霞

(哈尔滨工业大学应用化学系, 150006)

金光海 袁茵 孙光耀

(哈尔滨工业大学应用物理系)

摘要: 本文报道了用全息法研究铌酸锂(LN)晶体和掺镁铌酸锂(Mg:LN)晶体波导基片光损伤的结果。分别采用钛扩散和质子交换工艺制作波导基片; 其中 Mg:LN 晶体波导基片的抗光损伤能力高于 LN 基片, 质子交换波导片的抗光损伤能力高于钛扩散波导片。

关键词: 全息法, 铌酸锂波导基片, 光损伤

Study of light damage of waveguide substrates of LN and Mg:LN by holographic method

Li Minghua, Zhao Yequan, Liu Caixia, Xu Yuheng,

(Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin)

Jin Guanghai, Yuan Yin, Sun Guangyao

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin)

Abstract: The results of light damage in LN and Mg:LN substrate waveguide by holographic method are reported. The waveguide were made by Ti-diffusion and proton exchange methods. The resistance to light damage of Mg:LN is stronger than that of the pure LN, and the resistance of light damage of the waveguide by proton exchange is stronger than that by Ti-diffusion.

Key words: holographic method, lithium niobate waveguide, photo damage

一、引言

铌酸锂(LN)晶体具有压电效应、电光效应和非线性光学效应,是当前集成光学中制备无源器件的理想材料,已用于制成频谱分析器、光效调制器、光开关等器件。当较高功率的激光在LN平面光波导基片内传播时,会使波导基片产生光致折射率的变化,即光折变效应。由于晶体的光折变效应,当激光波前的强度分布非均匀(例如高斯分布)时,在晶体中传输的光束波前发生畸变,产生散射,即光损伤。光损伤限制了LN晶体在波导中的应用范围,所以研究波导基片的光损伤对选用基片材料及制订波导工艺都是很重要的。本文采用全息法研究LN波导光损伤发现,掺入5% mol MgO的Mg:LN基片的抗光损伤能力比纯LN基片提高两个数量级,而同是LN基片,采用质子交换(PE)工艺^[1]制作的波导片的抗光损伤能力比用钛扩散(Ti)工艺^[2]制作的波导片提高了两个数量级。

二、实验原理和现象

应用全息法测量光波导中光折变效应的光路如图 1 所示。波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光, 经由 S_1 、 S_2 、 M_2 和 M_3 组成的马赫-陈德尔干涉仪, 形成两个相干光束后, 由耦合棱镜 P_{in} 耦合入波导, 激发双束 TE₀ 模。通过透射率可变的分束器 S_2 , 既可调节双束光的强度比 I_1/I_2 , 也可调节双束间的夹角 2θ 。由于两个光束经相同的耦合棱镜 (P_{in} 、 P_{out}) 输入、输出波导, 输入光强 I_1 、 I_2 和输出光强 I'_1 、 I'_2 与波导内双束 TE₀ 模的衍射前后的强度值成相同的比例关系, 设该比例值为 β , 因而, 通过测定 I'_1 和 I'_2 即可确定波导内的衍射强度。波导内夹角为 2θ 的相干 TE₀ 模双束光, 在波导内干涉形成一个沿 z 向正弦变化的光强分布

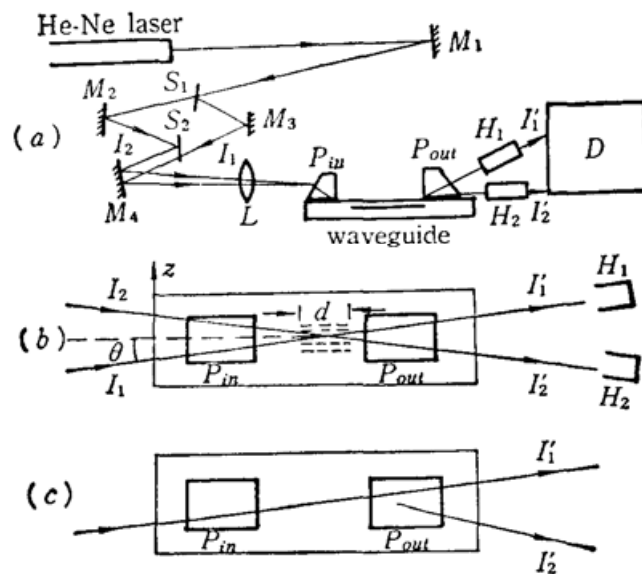


Fig. 1 Schematic diagrams for photorefractive index measurement of LN waveguides by holographic method

(a) Instruments arrangement; (b) Recording process; (c) Readout process

S_1 , S_2 —beam splitter; $M_1 \sim M_4$ —reflective mirror; L —convex lens; H_1 , H_2 —photoelectric multiplier tube; D —detector; P —coupling prism

$$I = \beta I_0 (1 + m \cos gz) \quad (1)$$

式中 $I_0 = I_1 + I_2$, β 为耦合系数, 调制度 $m = 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} / (I_1 + I_2)$, $g = 2k \sin \theta$, k 为光的波矢。光的干涉条纹由于波导的光折变效应, 在波导内形成一个沿 z 向正弦变化的折射率位相光栅^[3], 即记录了全息图, 或称记录光栅, 在光束直径为 1 mm, 双光束夹角为 3° 的实验条件下, 形成的记录光栅长度约为 $L \approx 38$ mm。当全息图再现时, 原记录的折射率位相光栅沿满足 Bragg 条件的方向形成衍射, 其衍射效率 η 可以通过实验测量按如下关系确定:

$$\eta = \frac{\text{输出的衍射光强}}{\text{输出的衍射光强} + \text{输出的未衍射光强}} \quad (2)$$

(1) 波导的光损伤现象

低功率单束光 I_1 输入时, 由棱镜 P_{out} 输出与 TE₀ 模对应的(窄)光斑, 也称 m 线, 如图 2(a), x - y 记录仪显示在较长时间内 m 线中心处光强稳定。当输入光 I_1 增大时, 输出的 TE₀ 模光斑随时间沿负 z 向有明显的拉长, 形成非对称的光损伤, 如图 2(b)所示, x - y 记录仪显示光斑中心处的强度明显下降至较低值。发生光损伤时的光强, 可确定为光损伤阈值(观察时

间为10 min)。

(2) 双光束干涉及衍射现象

用两束光 I_1 和 I_2 输入激发波导的双束 TE_0 模, 由 P_{out} 棱镜输出后, 在观察屏上观察到对应于双束 TE_0 模的两个中心亮斑, 如图 3 所示。两束光输入一段时间后(10s 至 10min 多不等), 挡住 I_2 光, I_1 光作为读出光, 在输出观察屏上可以看到原 I_2 输出光处仍有光斑, 这是双光束干涉记录的全息图对 I_1 光的衍射结果。用 $x-y$ 记录仪记录衍射光和非衍射光的输出, 然后根据(2)式, 计算衍射效率 η 。在全息图的读出过程中, 衍射光强随时间逐渐下降, 最终甚至消失, 如图 4 的(a)、(b)、(c)所示。其中(a)为开始情况, (b)为读出过程, (c)为衍射光消失。衍射光强在全息图读出过程中随时间下降的特性, 反映出 I_1 光对全息图的读出过程同时也是对全息图的擦除过程, 其变化特性如图 5 的实验曲线所示。(a)为写入 60 秒后, (b)为写入 90 秒后的读出过程。

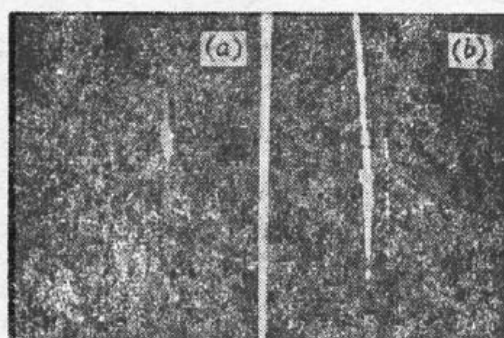


Fig. 2 Light spots of TE_0 mode (m line) before (a) and after (b) the light damage



Fig. 3 Light spots of two beam TE_0 mode

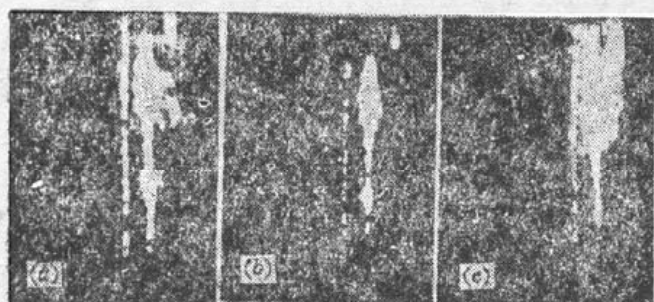


Fig. 4 Readout process of holographic diagram

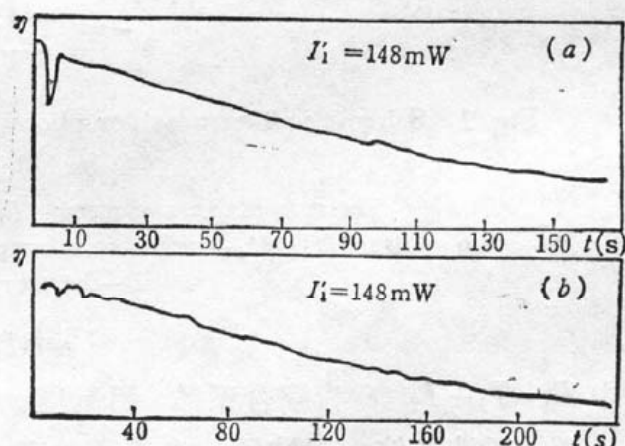


Fig. 5 Readout process of holographic grating

三、实验结果及处理

根据 B. Fischer 等人的全息理论^[3], 光折变效应产生的折射率位相光栅可写成

$$n = n_0 + \Delta n \sin(\vec{K} \cdot \vec{r}) \quad (3)$$

其中 $|\vec{K}| = |\vec{k}_1 - \vec{k}_2| = 2k \sin \theta$, Δn 为光折变效应引起的晶体折射率变化值, 它与晶体的电光系数、调制度 m 、波导内电子施主的密度以及波导电导率等参数有关。由(3)式给出的折射率位相光栅对满足 Bragg 衍射角的入射光形成一级衍射, 其衍射效率为^[4]

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi L n_0}{\lambda \cos \theta} \cdot \Delta n \right) \quad (4)$$

其中 L 为光栅长度, n_0 为波导折射率, 由此可得到折射率变化 Δn 与衍射效率的关系为

$$\Delta n = \frac{\lambda \cos \theta}{\pi L n_0} \sin^{-1} \sqrt{\eta} \quad (5)$$

同时为了评价波导的光折变效应特性, 用下列关系式定义了波导的光折变灵敏度 S

$$S = \frac{\Delta n}{\alpha E_0} (\text{cm}^2/\text{J}) \quad (6)$$

其中 α 为波导的吸收系数, E_0 为记录全息图时总输入能量密度, $E_0 = I_0 \cdot t$ 。表 1 中列出了用全息法测量得到的钛扩散 LN 波导片 (Ti:LN)、质子交换 LN 波导片 (PE:LN) 和质子交换 Mg:LN 波导片 (PE:Mg:LN) 的光折变效应性能参数。表 1 中 $I_1:I_2$ 表示记录全息图时的光强比, t 为全息图的记录时间, I_1' 和 I_1'' 分别表示读出全息图的未衍射光强和衍射光强 (选取挡住 I_2 光时的瞬时衍射光强值)。

Table 1 Light damage properties of LN waveguides

Waveguides	$I_1:I_2$	I_1' (mW)	I_1'' (mW)	t (s)	η (%)	Δn	E ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	αS (cm^2/J)
Ti:LN	2:1	14.8	1.0	10	6.8	5.10×10^{-7}	1.0×10^3	5.10×10^{-9}
			3.6	30	20	9.40×10^{-7}	3.0×10^3	3.1×10^{-9}
			9.9	60	40	1.39×10^{-6}	6.0×10^3	2.3×10^{-9}
			11.6	90	44	1.47×10^{-6}	9.0×10^3	1.6×10^{-9}
PE:LN	2:1	8.1	1.5	120	16	8.2×10^{-7}	1.8×10^4	4.5×10^{-11}
			2.8	420	26	1.1×10^{-6}	6.3×10^4	1.7×10^{-11}
			3.5	3600	30	1.2×10^{-6}	5.4×10^5	2.2×10^{-12}
			3.5	3500	30	1.2×10^{-6}	5.9×10^5	2.0×10^{-12}
PE:Mg:LN	2:1	8.2	0.8	3800	9	6.5×10^{-7}	2.9×10^3	2.2×10^{-13}
			1.2	4200	13	8.1×10^{-7}	3.2×10^3	2.5×10^{-13}

(1) 表 1 中的实验测定结果表明, 全息图的衍射效率 η 在同一记录条件下随记录时间的延长具有饱和性, 即折射率改变量 Δn 具有饱和值, 我们认为这是由于波导内电子施主的密度有限所致。(2) 光折变效应引起的折射率改变量 Δn 的饱和特性, 决定了光折变灵敏度 s 随记录时间的延长而下降 (公式 (6))。(3) 若选取 Δn 饱和时的光折变灵敏度进行讨论, Ti:LN 波导的光折变灵敏度 ($\alpha S \sim 10^{-9} \text{cm}^2/\text{J}$), 比 PE:LN 波导的光折变灵敏度 ($\alpha S \sim 10^{-12} \text{cm}^2/\text{J}$) 高三个量级, 比 PE:Mg:LN 波导的光折变灵敏度 ($\alpha S \sim 10^{-13} \text{cm}^2/\text{J}$) 高四个量级。

(4) LN 光波导的光损伤是其光折变效应的结果, 因此光折变灵敏度反映了波导抗光损伤能力, 波导的光折变灵敏度愈高, 其抗光损伤能力愈低, 故 PE:Mg:LN 光波导的抗光损伤能力最强, 其次为 PE:LN 光波导, Ti:LN 光波导的抗光损伤能力最差。

参 考 文 献

1. I. L. Jsekel *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 607 (1982)
2. R. V. Schmidt *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 458 (1974)
3. B. Fischer *et al.*, *Opt. Lett.*, **6** (11), 519 (1981)
4. A. Yariv, *Introduction to Optical Electronics*, Holt. Rinehart Wiston, 1976, 344~351