

掺镁铌酸锂质子交换光波导 光学性能的研究*

侯卫星 华王祥 张雁行 谭浩然

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

提 要

本文用质子交换反应在 5 mol % MgO:LiNbO₃ 晶体中引起了 e 光折射率的增加, 晶体中 MgO 的存在并不影响 LiNbO₃ 质子交换光波导阶跃型折射率分布的特点。用常规的质子交换法制备的 MgO:LiNbO₃ 波导存在着损耗大和有效折射率不稳定的缺点, 经过退火处理后, 这些缺点可明显地得到改善。

关键词: 掺镁铌酸锂晶体, 质子交换光波导。

一、引 言

铌酸锂(LiNbO₃)质子交换波导在集成光学的研究中占据重要的地位^[1,2]。但是纯质 LiNbO₃ 晶体在中等功率密度的激光辐照下容易产生光折变效应^[3], Y 切割的质子交换波导表面极易损伤^[4], 这两个原因使得纯质 LiNbO₃ 晶体在波导器件及其声表面波技术方面的应用受到了限制。

近年来, 有人尝试用抗光伤能力较强的 5 mol % MgO:LiNbO₃ 晶体制作质子交换波导^[5,6,7], 发现掺镁的 Y 切割波导没有表面损伤现象, 抗光损伤能力比纯质 LiNbO₃ 波导提高了一倍, 但是, 对于这种掺镁波导的光学性能的研究却很少。本文报道了利用离子探针分析仪、棱镜耦合器和图象分析仪等于段对 MgO:LiNbO₃ 质子交换光波导光学性能的研究结果。

二、实验和结果

1. 实验方法

采用常规的质子交换法在 X 切割、Y 切割和 Z 切割的 5 mol % MgO:LiNbO₃ 基片上制备平面波导。用法国的 IMS3F 型离子探针分析仪测量波导的二次离子质谱(SIMS), 用单棱镜耦合法观察并测量波导的模式分布和有效折射率, 并根据 J. M. White 的折线近似法^[8]模拟波导的有效折射率剖面。用普通的照相机摄下波导中模式传输线照片, 然后用法国的 PC-100 图象处理系统-图象分析仪探测照片中传输线的辉度, 根据传输线的光强分布曲

线计算了波导的光损耗。

2. 实验结果

用二次离子质谱(SIMS)观察在质子交换后 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体的组分变化。图 1 给出了 X-001 样品的二次离子谱, 样品是在 220°C 的温度下交换 2 小时得到的。

可以看出, Nb^{5+} , Mg^{2+} , O^{2-} 等离子浓度沿深度方向的分布保持不变, 而 Li^+ 在波导区域内有明显的缺损。因此 MgO 掺入 LiNbO_3 晶体后并不参与质子交换反应, Mg^{2+} 浓度是恒定的。

棱镜耦合法测量表明, $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 质子交换光波导的模式激励与外部入射光源的偏振方向有关。在 X 切割 Y 方向传输或 Y 切割 X 方向传输波导中只能维持 TE 模, 而在 Z 切割 X 方向传输波导中只能维持 TM 模, 因此质子交换反应在 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体中引起了 e 光折射率的增加。

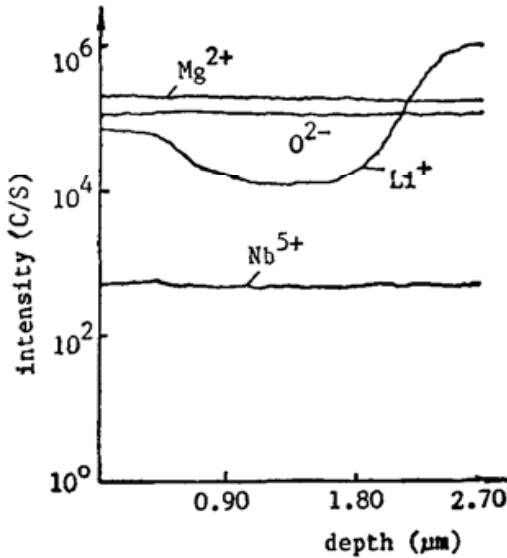


Fig. 1 Typical SIMS spectrum for X-001 sample

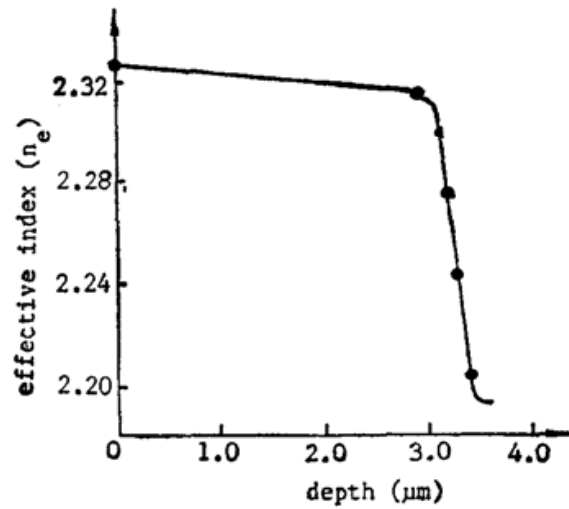


Fig. 2 Effective index (n_e) profile of X-003 sample at $\lambda = 6328 \text{ nm}$

图 2 表示了 X-003 样品有效折射率剖面图, 该波导共有五个 TE 模, 表面折射率改变 $\Delta n_s \approx 0.130$ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, 耦合棱镜折射率 $n_p = 2.872$), 很显然, 这种 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 波导具有阶跃型的折射率分布。作者^[9]在分析纯质 LiNbO_3 质子交换波导的 n_e 增加的机理时曾指出: 晶格中 Li^+ 离子的缺失导致自发极化强度的减小是引起 n_e 增加的主要原因。从二次离子谱的结果看, MgO 掺入晶体后, Mg^{2+} 并没有参加质子交换反应, 因此引起 e 光折射率增加的原因仍然是 Li^+ 的缺失, 这样 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 波导在光学特性上保持了纯质 LiNbO_3 波导阶跃型 n_e 分布的特点。

在观察 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 波导的模式分布过程中发现, 相邻的 m 线之间的间隔随着模阶的升高逐渐变宽, 表现出均匀波导的特点, 因而从另一个角度证实了折线近似法模拟的阶跃型折射率分布的结果是正确的。

图 3 是 X-003 样品的模式传输线照片及其对应的光强分布曲线。经计算, 高次模 ($\nu \geq 4$) 的损耗约为 2.04 dB/cm , 低次模 ($\nu < 4$) 的损耗约为 0.95 dB/cm , 因此, 作者认为 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 质子交换波导的损耗大约在 $1.0 \sim 2.0 \text{ dB/cm}$ 之间, 这个损耗值对于实际的波导器件来讲是比较高的。若把该样品在 270°C 的温度下退火 2 小时, 发现退火前后传输线的

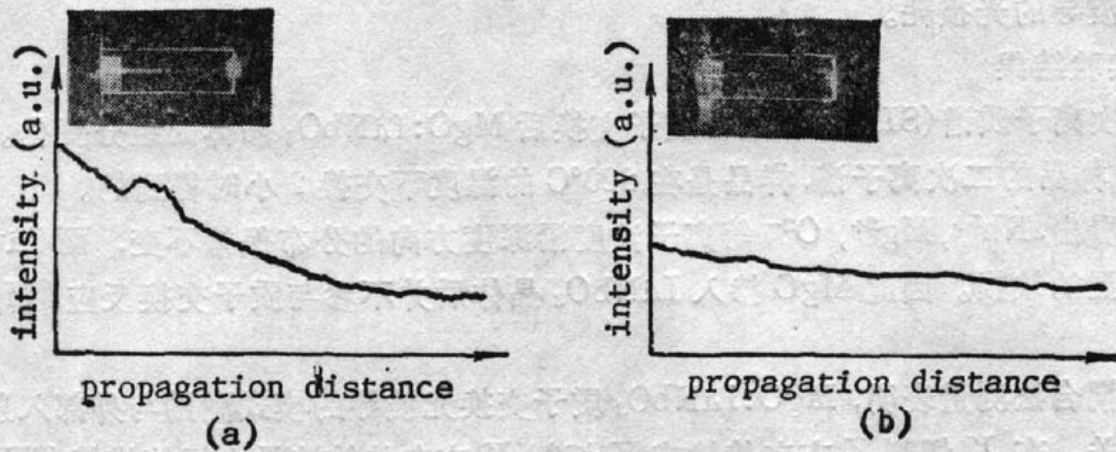


Fig. 3 Propagation streak photograph and distribution of light intensity over propagation distance for X-003 sample. (The actual propagation distance is 16 mm)
(a) before annealing; (b) after annealing (annealed at 270°C for 2 hr.)

形状及其光强分布曲线发生了明显的变化。未退火前,传输线略有发散,光强随着传输距离

明显下降[图3(a)],退火后,传输线变得细窄,亮度均匀,光强变化比较平稳[图3(b)],这说明波导经过退火处理后,损耗源减小了。经计算,基模($\nu=0$)的损耗只有0.4 dB/cm,而通常人们用得最多的是单模波导,因此,经过退火处理后的MgO:LiNbO₃质子交换单模波导的损耗可望下降至0.4 dB/cm以下,这样低的损耗基本上能满足器件设计的要求。

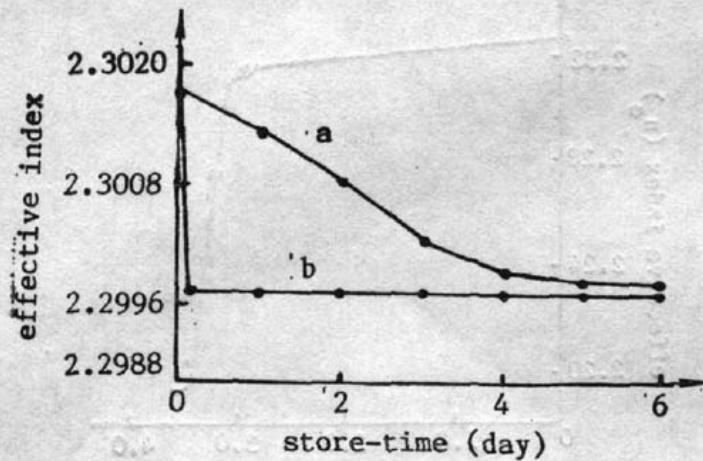


Fig. 4 Variation of effective index as a function of store-time measured on Y-cut samples exchanged at 236°C for 0.5 hr.

(a) unannealing sample; (b) annealing sample (annealed at 270°C for 2 hr.)

有效折射率随着存放时间出现波动,在刚开始的几天内,折射率急剧下降,几天后趋于缓慢变化,见图4曲线a,我们分别称之为快衰变过程和慢衰变过程。可见用常规的质子交换法制备的MgO:LiNbO₃波导存在着有效折射率不稳定的缺点,这种不稳定性会严重地影响波导器件的可靠性和一致性,为了克服这个困难,可以把同样工艺条件下制备的波导在265°C的温度下退火1.5小时,结果发现,折射率的快衰变过程消失了,见图4曲线b,模式折射率从退火前的2.3017一下子降到2.2997,并在随后的测量过程中保持不变,存放了半年以后再行测试,结果发现有效折射率仍然是2.2997,波动在 10^{-4} 以后,可见退火消除了MgO:LiNbO₃波导的有效折射率的不稳定,改善了波导的性能。

三、结 论

研究表明, MgO:LiNbO₃ 质子交换光波导在光学性能上保持了大的折射率增加

($\Delta n_e \approx 0.130$) 和阶跃型 n_e 分布的特点, MgO:LiNbO₃ 晶体作为一种新的介质材料可望在集成光学研究中发挥更大的作用。虽然用常规的质子交换法制备的 MgO:LiNbO₃ 光波导具有大的光损耗和有效折射率不稳定的弱点, 但是适当条件下的退火处理可以起到改善性能的作用, 可以预料, 质子交换后加上退火处理的工艺将成为今后质子交换制备的主要技术。

参 考 文 献

- [1] J. L. Jackel, C. E. Rice *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**, No. 7 (Oct), 607.
- [2] R. R. Syms; *Opt. & Quant. Electron*, 1988, **20**, No. 3 (Mar), 189.
- [3] D. A. Bryan, R. R. Rice; *Opt. Engng.*, 1985, **24**, No. 1 (Jan), 138.
- [4] G. Canali; *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**, No. 8 (Apr), 2643.
- [5] M. Digonnet, M. Fejer *et al.*; *Opt. Lett.*, 1985, **10**, No. 5 (May), 235.
- [6] 许政权等; 私人通信。
- [7] 袁茵等; 私人通信。
- [8] J. M. White, P. F. Heidrich; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 1 (Jan), 189.
- [9] 侯卫星; «硕士论文», (中国科学院上海硅酸盐研究所), 1989。

Optical properties of MgO-doped LiNbO₃ proton-exchanged optical waveguides*

HOU WEIXING, HUA WANGXIANG, ZHANG YIEXIN AND TAN HAORAN

(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 200050)

(Received 18 June 1990; revised 4 September 1990)

Abstract

Proton-exchange process causes the increase of extraordinary refractive index in 5 mol% MgO:LiNbO₃ crystal, and the existence of MgO does not affect the step-like index profile of LiNbO₃ proton-exchanged waveguide. Large propagation loss and instabilities of effective index are present in MgO-doped waveguides fabricated by conventional proton-exchange process, but these drawbacks can be apparently improved by post-annealing treatment.

Key words: MgO:LiNbO₃, proton-exchanged waveguide.

* This project is supported by the National Natural Science Foundation of China.