

文章编号: 0258-7025(2004)09-1041-04

新的质子源质子交换制作的 Z 切 LiNbO₃ 光波导特性

符运良^{1,3}, 袁一方¹, 金国良², 陈抱雪¹

¹ 上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093
² 上海交通大学应用物理系, 上海 200240; ³ 海南师范学院物理系, 海南 海口 571158

摘要 研究了用己二酸和苯甲酸的不同混合摩尔比作为质子源交换制作的 Z 切 LiNbO₃ 光波导的表面折射率改变、波导深度、折射率分布等光学特性。结果表明,在交换温度为 230℃,交换时间为 6 h 时,混合摩尔比较高时,波导为 β_4 相;较低时,为 β_3 相。在 β_4 相时,混合摩尔比越大,波导的表面折射率改变和波导的深度越大;在 β_3 相时,不同的混合摩尔比交换的波导光学特性差别不明显。用双晶 X 射线衍射法对单苯甲酸和混合摩尔比为 60% 制作的光波导进行 X 射线衍射。以上结果对波导器件的制作及理解波导折射率改变的物理机制提供了一些有用的信息。

关键词 导波光学; LiNbO₃ 晶体; 质子源; 质子交换光波导; X 射线衍射

中图分类号 TN 491; TN 252 **文献标识码** A

Z-Cut LiNbO₃ Optical Waveguides Formed in a New Proton Source

FU Yun-liang^{1,3}, YUAN Yi-fang¹, JIN Guo-liang², CHEN Bao-xue¹

¹College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
²Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
³Department of Physics, Hainan Normal College, Haikou, Hainan 571158, China

Abstract The optical characteristics and waveguide index profiles of Z-cut LiNbO₃ optical waveguides which fabricated by using a new proton source formed by a mixture of adipic and benzoic acids with different values of the adipic-benzoic acid concentration ratio were studied. The experimental results show that the optical waveguides present β_4 -phase when high concentration ratio, while present β_3 -phase when relative low concentration ratio under the exchange temperature of 230℃ exchange time of 6 h. The higher the concentration ratio, the greater the surface refractive index change and waveguide depth of the optical waveguides in β_4 -phase, and the difference of optical properties in β_3 -phase is not significantly. The optical waveguides fabricated by using single benzoic acid and 60% ratio dilution were analyzed by double crystal X-ray diffraction. The results give useful information in making optical waveguides and to understand the physical mechanism of refractive index change in the LiNbO₃ optical waveguides.

Key words guided wave optics; LiNbO₃ crystal; proton source; proton-exchanged optical waveguides; X-ray diffraction

1 引 言

质子交换技术是制作高折射率、低损耗铌酸锂 (LiNbO₃) 光波导的一种非常成熟的方法^[1]。在质

子交换中可采用的质子源有苯甲酸^[2]、焦磷酸^[3]、己二酸^[4]等几种。文献[5]对用苯甲酸和焦磷酸制作的光波导特性进行了比较。文献[6]对 Z 切

收稿日期: 2003-06-09; 收到修改稿日期: 2003-09-02

基金项目: 上海光科技专项基金(012261026)和上海科学技术发展基金(B-08)资助项目。

作者简介: 符运良(1964—), 男, 海南临高人, 上海理工大学光学与电子信息工程学院副教授, 在读博士研究生, 主要从事光波导器件的研究。E-mail: fuyunliang@163.com

LiNbO₃ 质子交换平板波导的退火特性进行了研究。用己二酸和苯甲酸的混合作为质子源进行质子交换制作光波导,在国内还未曾见过报道。己二酸(C₆H₁₀O₄)和苯甲酸(C₇H₆O₂)这两种酸的分子式、分子量、结晶状态、单位体积质子浓度、熔点等物理和化学性质有差别。本文以这两种酸及它们的不同混合摩尔比例为质子源,质子交换制作 Z 切 LiNbO₃ 光波导,通过常规的棱镜耦合法测量光波导的有效折射率,由反 WKB 法模拟折射率分布,计算波导的深度,比较不同条件下制作的光波导光学特性。另对单苯甲酸和混合摩尔比例为 60% 这两种不同质子源交换制作的光波导进行 X 射线衍射。以上实验对光波导器件的制作及光波导折射率改变的物理机制的理解具有重要的指导意义。

2 Z 切 LiNbO₃ 光波导的制作

质子交换所用的材料为 Z 切 LiNbO₃ 晶体,质子源为单己二酸、单苯甲酸及它们的不同混合摩尔比,混合摩尔比分别为 20%, 30%, 40%, 60% 和 80%。交换温度为 230℃,交换时间为 6 h。

实验时,先将清洗干净的 LiNbO₃ 晶片置入特制的弯形玻璃管,放入恒温较好的交换炉中进行加热。待质子源充分溶解后,翻转管子让 LiNbO₃ 晶片完全浸入酸溶液中进行质子交换。交换结束后,再翻转管子,使 LiNbO₃ 晶片与酸液脱离,关掉电源,使温度降到室温。

采用底角为 45° 的红宝石棱镜进行光耦合使光进入光波导,测量导模的有效折射率,Z 切 LiNbO₃ 晶片光波导导模为 TM 模,光波长为 632.8 nm。

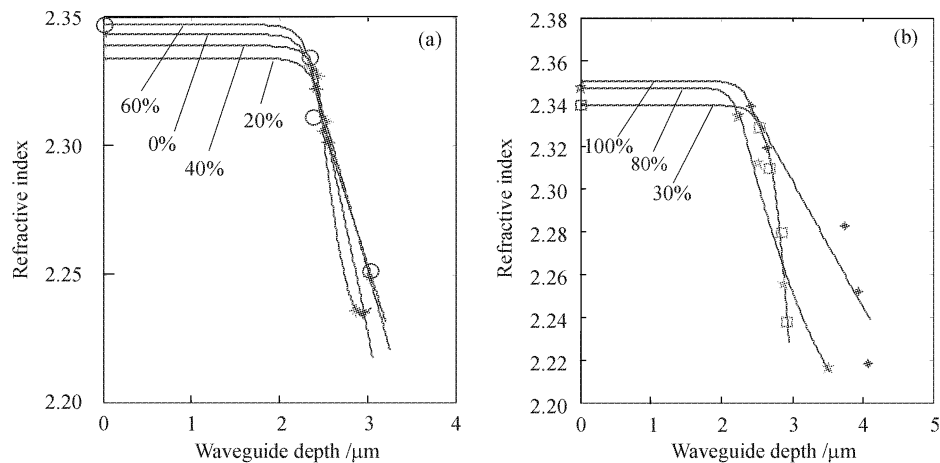


图 1 Z 切 LiNbO₃ 质子交换光波导折射率分布曲线(己二酸:苯甲酸(摩尔比))

Fig. 1 Refractive index profile of Z-cut LiNbO₃ optical waveguides (adipic acid:benzoic acid (mol ratio))

表 1 Z 切 LiNbO₃ 光波导的光学特性($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Table 1 Optical properties of Z-cut LiNbO₃ optical waveguides

Cut	Mode number	Adipic acid:benzoic acid (mol ratio)	Waveguide thickness / μm	Surface index change	Crystal phase
Z	4	Single benzoic acid	3.01655	0.14260	β_3
Z	4	20%	2.94877	0.13329	β_3
Z	4	30%	2.91562	0.13825	β_3
Z	4	40%	2.86468	0.13810	β_3
Z	4	60%	3.02165	0.14630	β_4
Z	5	80%	3.51991	0.14635	β_4
Z	6	Single adipic acid	4.07961	0.14947	β_4

3 实验结果与讨论

3.1 光波导的折射率分布

用棱镜耦合法测量出光波导导模的有效折射率

后,由反 WKB 法模拟光波导折射率分布,计算光波导的深度,表面折射率变化,结果如图 1 和表 1 所示。当质子源为单苯甲酸及己二酸和苯甲酸混合摩尔比分别为 20%, 30%, 40% 和 60% 这 5 种情况时,

质子交换得光波导模数为 4 模,而已二酸和苯甲酸混合摩尔比为 80% 时,光波导模数为 5 模,单己二酸为质子源时,交换得到的光波导模数为 6 模。可见己二酸和苯甲酸混合摩尔比较高时,交换得到模数也较多。由表 1 可看出,己二酸和苯甲酸混合摩尔比不同时,得到波导的深度和波导表面折射率变化也不相同,单己二酸作为质子源时,交换得到的光波导深度最大 4.07961 μm ,表面折射率变化最大 0.14947;己二酸和苯甲酸混合摩尔比为 80% 时交换制作的光波导,其波导深度为 3.51991 μm ,波导表面折射率变化为 0.14635;己二酸和苯甲酸混合摩尔比为 60% 时交换制作的光波导,波导深度和表面折射率变化分别为 3.02165 μm 和 0.14630。在单苯甲酸及己二酸和苯甲酸混合摩尔比分别为 20%,30%,40% 这 4 种情况下,质子交换得到的光波导特性进行比较,发现单苯甲酸质子交换得到的光波导深度和波导表面折射率变化反而比其他三种情况下得到的光波导的深度和表面折射率变化稍大,分别为 3.01655 μm 和 0.14260。但从图 1(b) 中可看出,当己二酸和苯甲酸混合摩尔比为 30% 时,得到的光波导折射率分布比其他的几种情况下得到的光波导折射率分布更接近于线性阶跃型分布。

质子交换过程是酸中的 H⁺ (质子) 交换出 LiNbO₃ 晶体中的 Li⁺,从而在表面形成波导层,交换进 LiNbO₃ 晶体中的 H⁺ 取代了 Li⁺ 的位置,成为替代原子,在表面层内形成 H_xLi_{1-x}NbO₃ 的独立层。H 在交换层中分布是渐变的,表面的 x 值最大,但 Δn_e 与 H 的浓度呈非线性关系。己二酸内含 10 个 H 原子,苯甲酸内含 6 个 H 原子,在相同的摩尔数中,己二酸含有的 H 原子数比苯甲酸中含有的 H 原子数多,即己二酸含有丰富的 H 原子,这表明己二酸作为交换质子源时,H⁺ 交换的速度比苯甲酸作为质子源时交换的速度快,因此在光波导中,H⁺ 浓度大,扩散深,结果导致光波导的深度大,表面折射率变化大。但质子交换可以出现 7 种不同的晶相,而不同的晶相使得即使在制作波导条件相同的情况下,波导内可有不同的 H 浓度,这个原因可能是导致单苯甲酸作为质子源时,交换得的光波导深度和表面折射率变化比己二酸和苯甲酸混合摩尔比较低时交换得到的光波导深度和表面折射率变化稍大的结果。

3.2 光波导的双晶 X 射线衍射

对单苯甲酸和己二酸与苯甲酸混合摩尔比为 60% 两种不同情况下交换制作的光波导进行 X 射线衍射。X 射线衍射谱如图 2 所示。

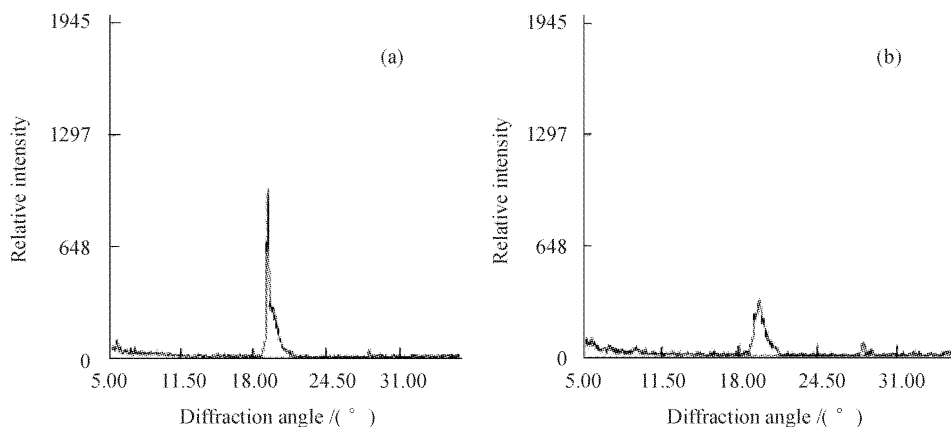


图 2 Z 切 LiNbO₃ 光波导的 X 射线衍射图样

(a) 光波导 a(质子源为己二酸:苯甲酸=60%摩尔比);晶格常数 $d=0.4586$ nm,衍射角 $2\theta=19.340^\circ$,半宽 $w=0.440^\circ$;

(b) 光波导 b(质子源为单苯甲酸);晶格常数 $d=0.4512$ nm,衍射角 $2\theta=19.660^\circ$,半宽 $w=0.960^\circ$

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of Z-cut LiNbO₃ optical waveguides

(a) optical waveguide a (adipic acid:benzoic acid=60% mol ratio); crystal lattice constant $d=0.4586$ nm, diffraction angle $2\theta=19.340^\circ$, half-width $w=0.440^\circ$; (b) optical waveguide b (single benzoic acid); crystal lattice constant $d=0.4512$ nm, diffraction angle $2\theta=19.660^\circ$, half-width $w=0.960^\circ$

从图 2 可看出,两种质子源以 60% 混合摩尔比交换制作的光波导的 X 射线衍射峰比单苯甲酸交

换制作的光波导的 X 射线衍射峰强度大,衍射角小,根据 X 射线衍射的布拉格方程 $2d\sin\theta=\lambda$,衍射

角小,即意味着晶格常数大。以上结果表明,60%混合摩尔比质子源交换制作的光波导其光波导深度比单苯甲酸质子源交换制作的稍大,同时表明质子交

换后,质子置换晶体晶格畸变使 LiNbO₃ 晶体的 C 轴增大,晶格体积变大,Δ*n_e* 增加。这两种情况下交换制作的光波导光学特性如表 2 所示。

表 2 用两种不同质子源制作的光波导的光学特性(λ=632.8 nm)

Table 2 Optical properties of optical waveguides by using two different proton source

Proton source	Single benzoic acid	Adipic acid:benzoic acid=60% (mol ratio)
$M_{th} = 0$	2.33120	2.33478
$M_{th} = 1$	2.30974	2.31127
$M_{th} = 2$	2.28616	2.28802
$M_{th} = 3$	2.24918	2.25173
Surface index change	0.14260	0.14630
Waveguide depth / μm	3.01655	3.02165

4 结 论

己二酸和苯甲酸的分子式不同,己二酸内含有丰富的 H 原子,在相同的交换温度和交换时间下,己二酸作为质子源交换得的光波导导模数明显多于苯甲酸作为质子源交换得的波导的导模数,且波导表面折射率变化和波导深度也较大。当这两种酸以不同的摩尔比例混合时,交换得的波导表面折射率变化和波导深度也不同。

参 考 文 献

- 1 J. L. Jackel, C. E. Rice, J. J. Veselka. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(7):607~608
- 2 D. F. Clark, A. C. G. Nutt, K. K. Wong *et al.*.

- Characterization of proton-exchange slab optical waveguides in Z-cut LiNbO₃[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(11):6218~6220
- 3 C. Ziling, L. Pokrovskii, N. Terpugov *et al.*. Optical and structural properties of annealed PE:LiNbO₃ waveguides formed with pyrophosphoric and benzoic acids [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(7):3125~3132
 - 4 E. Y. B. Pun, K. K. Loi, C. F. Mak *et al.*. High-index proton-exchanged MgO:LiNbO₃ optical waveguides using adipic acid [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(6):3114~3116
 - 5 Chen Yunlin, Zhang Huimin, Li Shichen. Proton-exchanged optical waveguides in Z-cut LiNbO₃ using different acid [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1997, **8**(5):337~340
陈云琳,张会敏,李世忱. 不同质子源的 Z 切 LiNbO₃ 质子交换平面光波导的研究[J]. *光电子 • 激光*, 1997, **8**(5):337~340
 - 6 Chen Xianfeng, Xie Shengwu, Xia Yuxing *et al.*. Theoretical modeling and characterization of anneamed proton-exchanged planar waveguides in Z-cut LiNbO₃ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(7):611~615
陈险峰,谢绳武,夏宇兴等. Z-切割铌酸锂质子交换平板波导的退火过程研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(7):611~615