

X 切 H : LiNbO₃ 光波导的工艺仿真研究*

黄 韬¹ 金 锋^{1,2} 刘福民¹ 徐宇新¹

(1 中国航天时代电子公司研究院,北京 100854)

(2 中科院长春光学精密机械与物理研究所,长春)

摘 要 对于 X 切 H : LiNbO₃ 光波导,在 532 nm 和 1310 nm 波长下,用棱镜耦合器进行了工艺仿真研究. 对于在 150℃,180℃和 200℃用苯甲酸质子交换的光波导,分别求得交换厚度与交换时间的关系曲线,在此基础上给出质子交换的扩散系数与交换温度的关系曲线. 对于在 180℃质子交换并在 350℃退火的光波导,给出以交换时间(交换厚度)为参变量的表面折射率增量、有效厚度与退火时间的关系曲线. 研究结果可供低损耗 α 相单模波导的设计和制备做参考.

关键词 铌酸锂;光波导;质子交换;退火

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

0 引言

H : LiNbO₃ 光波导具有制备工艺简单、传播损耗低、单偏振工作等优点,因此广泛用来制备调制器、光开关、倍频器和激光器,对其质子交换和退火等制备工艺已有深入的研究^[1].

H : LiNbO₃ 光波导的工艺仿真,就是要在实验上求得光波导结构参数(折射率增量、有效厚度)与制备工艺参数(质子交换温度、时间及退火温度、时间)的关系曲线. N. Goto 和 G. L. Yip 等人,对于用焦磷酸质子交换的 z 切 LiNbO₃ 退火光波导,在 633 nm 光波长做了工艺仿真研究^[2,3]. 但是,其工艺仿真曲线中的表面折射率增量远大于 α 相的最大折射率增量 0.03^[4],故这样的仿真曲线不能用于低损耗 α 相单模波导的设计和制备. 对于 x 切 LiNbO₃ 退火质子交换光波导,目前尚未见到能用于低损耗 α 相单模波导设计的工艺仿真研究报导.

本文对 x 切 H : LiNbO₃ 光波导,分别在 532 nm 和 1310 nm 光波长,用 Metricon2010 型棱镜耦合器进行了比较系统的工艺仿真研究,给出光波导结构参数与制备工艺参数的关系曲线. 退火波导工艺仿真曲线中的表面折射率增量在 0.03 左右,因此研究结果可用于低损耗 α 相单模波导的制备和设计.

1 质子交换工艺仿真

将 x 切 LiNbO₃ 晶片分别放入 150℃、180℃和 200℃苯甲酸中进行质子交换,制备出对应这三种温度的若干质子交换光波导样品. 质子交换光波导具有近似阶跃性折射率分布,可视做平板波导^[2]. 对这些质子交换光波导样品的结构参数,即折射率增

量 Δn_e 和交换厚度 d_e ,在 532 nm 光波长用棱镜耦合器进行测量,结果列入表 1. 其中,折射率均指非常光折射率, T_e 和 t_e 分别为质子交换的摄氏温度和时间.

表 1 质子交换光波导结构参数的测量数据

(a) $T_e = 150^\circ\text{C}$					
t_e/h	1.5	2	2.5	5.5	6
$d_e/\mu\text{m}$	0.283	0.323	0.357	0.548	0.570
$\Delta n_e(532\text{nm})$				0.141	0.141
(b) $T_e = 180^\circ\text{C}$					
t_e/h	5/6	2	3	4	
$d_e/\mu\text{m}$	0.309	0.568	0.709	0.950	
$\Delta n_e(532\text{nm})$		0.138	0.139	0.137	
(c) $T_e = 200^\circ\text{C}$					
t_e/h	0.5	1	2	3	4
$d_e/\mu\text{m}$	0.315	0.663	0.938	1.301	1.436
$\Delta n_e(532\text{nm})$		0.138	0.140	0.139	0.139

根据简单扩散理论, d_e 与 t_e 的关系式为

$$d_e = 2 \sqrt{D_e t_e} \quad (1)$$

式中,扩散系数可写成

$$D_e = D_0 \exp[-E/(KT)] \quad (2)$$

D_0 为扩散常数, E 为激活能, K 为玻尔兹曼常数, $T = 273 + T_e$ 为质子交换的绝对温度. 由于从 LiNbO₃ 晶片及其夹具放入苯甲酸开始到实现热平衡需要一定的预热时间 t_0 ,故式(1)应改写成

$$d_e = 2 \sqrt{D_e}(\sqrt{t_e} - \sqrt{t_0}) \quad (3)$$

图 1 是以 T_e 为参变量的 $d_e \sim \sqrt{t_e}$ 关系曲线. 其中,各种实心点表示测量数据,实线是拟合曲线. 做为拟合常数的扩散系数,列入表 2. 与图 1 相对应的仿真公式为

$$d_e/\mu\text{m} = \begin{cases} 0.2384(\sqrt{t_e} - \sqrt{0.0033}), T_e = 150^\circ\text{C} \\ 0.5678(\sqrt{t_e} - \sqrt{0.1585}), T_e = 180^\circ\text{C} \\ 0.8677(\sqrt{t_e} - \sqrt{0.0889}), T_e = 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

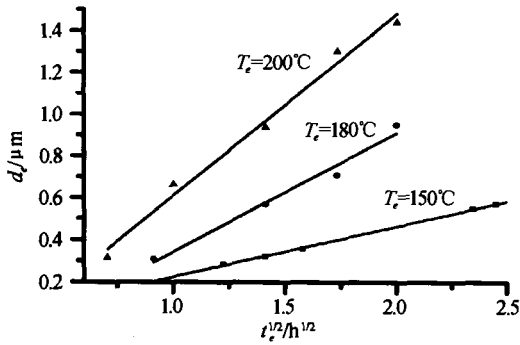


图 1 $d_e \sim t_a$ 关系曲线
Fig. 1 The relation curves of $d_e \sim t_a$

表 2 质子交换扩散系数

$T_a/^\circ\text{C}$	150	180	200
$D_e/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	0.0142	0.0806	0.1882

图 2 是 $D_e \sim T$ 的关系曲线. 其中, 实心点表示测量数据, 实线是式 (2) 的拟合曲线, 做为拟合常数的扩散常数为 $D_0 = 8.53 \times 10^7 \mu\text{m}^2/\text{h}$, 而激活能为 $E = 0.8124 \text{ eV}$, 与图 2 相对应的仿真公式为 $D_e/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}) = 8.53 \times 10^7 \exp[-9.426 \times 10^3/T]$ (5)

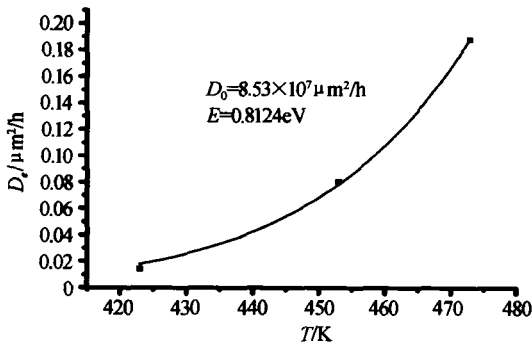


图 2 $D_e \sim T$ 关系曲线
Fig. 2 The relation curve of $D_e \sim T$

由表 1 可知, Δn_e 随 t_a (d_e) 变化基本保持常数, 并且在 $T_a = 150 \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内, Δn_e 基本上与 T_a 无关, 有 $\Delta n_e(532 \text{ nm}) \approx 0.14$. 为了提高 d_e 的控制精度, t_a 应较长一些. 所需的 d_e , 可用图 1 和图 2 及仿真公式 (4) 和 (5), 调整 T_a 和 t_a 而求得. 并且 d_e 直接关系到退火质子交换光波导结构参数随退火时间的变化趋势.

2 退火工艺仿真

退火质子交换铌酸锂光波导的折射率分布, 可由广义高斯函数来模拟^[3]

$$n(y) = n_b + \Delta n_s \exp\left[-\left(\frac{y}{d}\right)^q\right] \quad (6)$$

式中, 表面折射率增量 $\Delta n_s = n_s - n_b$ 和波导有效厚度 d , 分别由如下两个公式来模拟^[3]

$$\Delta n_s = \Delta n_e (1 - p t_a^c) \quad (7)$$

$$d = d_e (1 + b t_a^p) \quad (8)$$

n_s 和 n_b 分别为波导的表面和衬底的折射率, y 为波

导深度方向的坐标, α 为决定折射率分布形状的幂指数, t_a 为退火时间, Δn_e 和 d_e 分别为退火前质子交换波导的折射率增量和交换厚度, b, c, p, q 为待定常数. 在式 (7) 和 (8) 中, 消去 t_a , 推得 Δn_s 与 d 的关系式

$$\Delta n_s = \Delta n_e \left[1 - p \left(\frac{d - d_e}{b d_e} \right)^{q/c} \right] \quad (9)$$

首先在交换温度 $T_a = 180^\circ\text{C}$, 交换时间 t_a 分别为 50, 75 和 100 min, 制备出三个 x 切 LiNbO₃ 质子交换光波导样品. 然后在退火温度 $T_a = 350^\circ\text{C}$, 对这三个光波导样品进行了间断的退火实验, 制备出退火质子交换波导, 退火时间为 $t_a = 0, 1, 2, 3.5, 5, 7 \text{ h}$. 对这些退火波导样品, 在 532 nm 和 1310 nm 光波长, 用棱镜耦合器测量光波导结构参数 Δn_s , d 和 α , 其结果列入表 3.

表 3 退火质子交换光波导结构参数的测量数据

(a) $t_e = 50 \text{ min}, d_e = 0.309 \mu\text{m}$						
t_a/h	0	2	3.5	5	7	
$\Delta n_s(532 \text{ nm})$		0.042	0.028	0.021	0.016	
$\Delta n_s(1310 \text{ nm})$		0.031	0.021	0.015	0.011	
$d/\mu\text{m}$	0.309	1.180	1.672	2.177	2.610	
α		1.661	1.723	1.754	1.559	
(b) $t_e = 75 \text{ min}, d_e = 0.424 \mu\text{m}$						
t_a/h	0	1	2	3.5	5	7
$\Delta n_s(532 \text{ nm})$		0.106	0.063	0.040	0.031	0.023
$\Delta n_s(1310 \text{ nm})$		0.086	0.044	0.028	0.022	0.016
$d/\mu\text{m}$	0.424	0.710	1.130	1.670	2.140	2.760
α		1.613	1.462	1.591	1.580	0.665
(c) $t_e = 100 \text{ min}, d_e = 0.560 \mu\text{m}$						
t_a/h	0	1	2	3.5	5	7
$\Delta n_s(532 \text{ nm})$		0.134	0.139	0.108	0.064	0.046
$\Delta n_s(1310 \text{ nm})$		0.090	0.115	0.086	0.032	0.024
$d/\mu\text{m}$	0.560	0.700	0.820	1.460	1.960	2.640
α		1.234	1.231	1.372	1.554	1.839

利用表 3 的数据和式 (6)~(8), 画出以 t_a (d_e) 为变量的 $\Delta n_s \sim t_a$, $d \sim t_a$ 和 $\alpha \sim t_a$ 关系曲线, 分别示于图 3~6. 其中, 各种实心点表示测量数据, 实线是拟合曲线, 拟合常数 b, c, p, q 列入表 4.

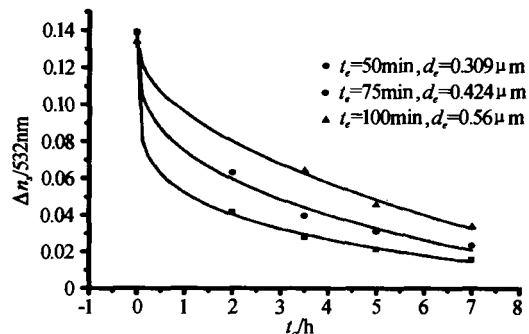


图 3 $\Delta n_s(532 \text{ nm}) \sim t_a$ 关系曲线
Fig. 3 The relation curves of $\Delta n_s(532 \text{ nm}) \sim t_a$

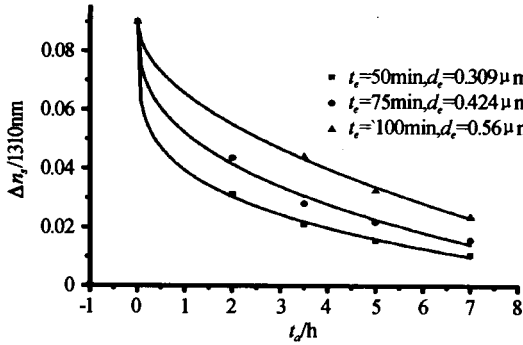


图4 $\Delta n_s(1310 \text{ nm}) \sim t_a$ 关系曲线
Fig. 4 The relation curves of $\Delta n_s(1310 \text{ nm}) \sim t_a$

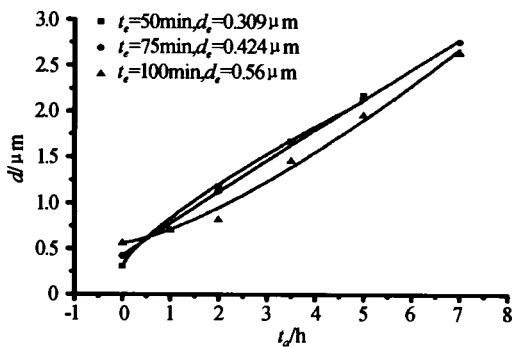


图5 $d \sim t_a$ 关系曲线
Fig. 5 The relation curves of $d \sim t_a$

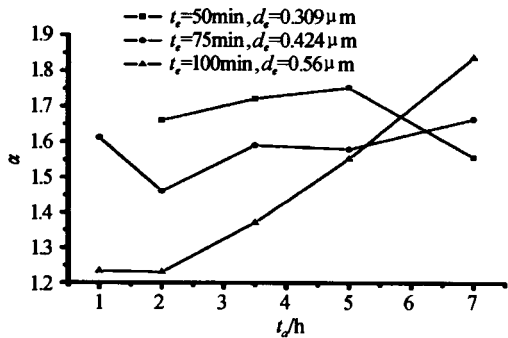


图6 $\alpha \sim t_a$ 关系曲线
Fig. 6 The relation curves of $\alpha \sim t_a$

表4 拟合常数 $b, c, p, q (T_s = 180^\circ\text{C}, T_s = 350^\circ\text{C})$

(a) $t_e = 50 \text{ min}, d_e = 0.309 \mu\text{m}$				
λ/nm	p	q	b	c
532	0.625	0.185	1.706	0.764
1310	0.563	0.235		
(b) $t_e = 75 \text{ min}, d_e = 0.424 \mu\text{m}$				
λ/nm	p	q	b	c
532	0.459	0.318	0.842	0.971
1310	0.422	0.356		
(c) $t_e = 100 \text{ min}, d_e = 0.560 \mu\text{m}$				
λ/nm	p	q	b	c
532	0.283	0.506	0.265	1.360
1310	0.273	0.515		

与图3、4和5相对应的仿真公式分别为

$$\Delta n_s(532 \text{ nm}) = \begin{cases} 0.139(1 - 0.625t_a^{0.185}), t_e = 50 \text{ min} \\ 0.139(1 - 0.459t_a^{0.318}), t_e = 75 \text{ min} \\ 0.134(1 - 0.283t_a^{0.506}), t_e = 100 \text{ min} \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta n_s(1310 \text{ nm}) = \begin{cases} 0.09(1 - 0.563t_a^{0.235}), t_e = 50 \text{ min} \\ 0.09(1 - 0.422t_a^{0.356}), t_e = 75 \text{ min} \\ 0.09(1 - 0.273t_a^{0.515}), t_e = 100 \text{ min} \end{cases} \quad (11)$$

$$d/\mu\text{m} = \begin{cases} 0.309(1 + 1.706t_a^{0.764}), t_e = 50 \text{ min} \\ 0.424(1 + 0.842t_a^{0.971}), t_e = 75 \text{ min} \\ 0.56(1 + 0.265t_a^{1.36}), t_e = 100 \text{ min} \end{cases} \quad (12)$$

将表4中的 b, c, p, q 的数据代入式(9), 得到 Δn_s 与 d 关系的仿真公式

$$\Delta n_s(532 \text{ nm}) = \begin{cases} 0.139 \left[1 - 0.625 \left(\frac{d - 0.309}{0.527} \right)^{0.242} \right], \\ d_e = 0.309 \mu\text{m} \\ 0.139 \left[1 - 0.459 \left(\frac{d - 0.424}{0.357} \right)^{0.327} \right], \\ d_e = 0.424 \mu\text{m} \\ 0.134 \left[1 - 0.283 \left(\frac{d - 0.56}{0.148} \right)^{0.372} \right], \\ d_e = 0.56 \mu\text{m} \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta n_s(1310 \text{ nm}) = \begin{cases} 0.09 \left[1 - 0.563 \left(\frac{d - 0.309}{0.527} \right)^{0.308} \right], \\ d_e = 0.309 \mu\text{m} \\ 0.09 \left[1 - 0.422 \left(\frac{d - 0.424}{0.357} \right)^{0.367} \right], \\ d_e = 0.424 \mu\text{m} \\ 0.09 \left[1 - 0.273 \left(\frac{d - 0.56}{0.148} \right)^{0.379} \right], \\ d_e = 0.56 \mu\text{m} \end{cases} \quad (14)$$

利用式(13)和(14), 画出以 d_e 和 t_a 为参变量的 $\Delta n_s \sim d$ 关系曲线分别示于图7和图8, 其中各种实心点

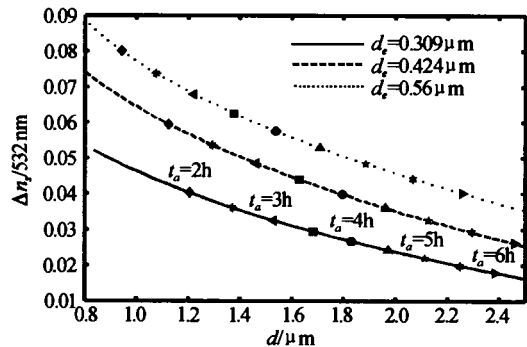


图7 $\Delta n_s \sim d$ 关系曲线 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)
Fig. 7 The relation curves of $\Delta n_s(532 \text{ nm}) \sim d$

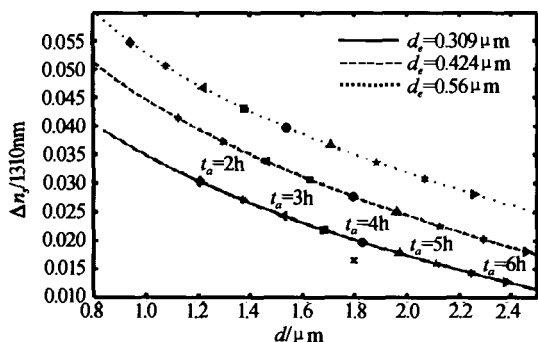


图 8 $\Delta n_s \sim d$ 关系曲线 ($\lambda = 1310 \text{ nm}$)

Fig. 8 The relation curves of $\Delta n_s(1310 \text{ nm}) \sim d$

表示 t_a . 退火质子交换光波导的工艺仿真可归结于这两个图,使用起来比较方便.

由图 3、4 和 5 可以看出,就退火质子交换波导而言, Δn_s 随 t_a 的增加而单调递减,且 d 随 t_a 的增加而单调递增. 对于确定的 t_a , Δn_s 随 $t_c(d_c)$ 的增加而增加;且对于确定的 $t_a > 1h$, d 随 $t_c(d_c)$ 的增加而递减. 由图 6 可见, α 随 t_a 的变化,先递减而后递增,根据有限源扩散理论,最终趋于 2;而在有用的 $t_a = 4 \sim 7h$ 范围内, $\alpha = 1.4 \sim 1.8$. 对于确定的 $t_a < 5h$, α 随 $t_c(d_c)$ 的增加而递减. 光波导结构参数 Δn_s 、 d 和 α 随 t_a 的变化趋势,与 $t_c(d_c)$ 紧密相关. 由图 7 和图 8 可以看到, Δn_s 随 d 的增加而单调递减,而对于确定的 d , Δn_s 随 $t_c(d_c)$ 的增加而增加.

对于确定的 $T_c = 180^\circ\text{C}$ 和 $T_a = 350^\circ\text{C}$,用图 3 至图 8 以及仿真公式(10)至(14),调整 t_c 和 t_a ,可以求得合适的退火质子交换波导结构参数 Δn_s 、 d 和 α ,设计出低损耗 α 相单模光波导.

3 单模条形波导工艺仿真

就退火质子交换条形光波导而言,带尾纤的光波导插入损耗可分解为光纤-光波导耦合损耗、光波导传播损耗和界面反射损耗. 低的耦合损耗要求光纤和光波导的光斑匹配,即它们的重叠积分要大一些. 低的传播损耗则要求光波导层处于 α 相.

为了实现低的插入损耗,首先根据式(6)用束传播方法对耦合损耗(重叠积分)进行模拟运算,寻找低耦合损耗的单模光波导结构参数 Δn_s 、 d 和 α 的取值范围(具体计算过程在另文中阐述). 再用仿真公式(10)~(14)以及图 3~图 8,寻找对应于低损耗光波导结构参数的工艺参数 t_c 和 t_a 的取值范围. 同时要考虑到这些工艺参数使光波导层处于 α 相,以便降低传播损耗.

根据上述优化设计方法,对于 $T_c = 180^\circ\text{C}$ 和 $T_a = 350^\circ\text{C}$,选用 $t_c = 50 \text{ min}$ 和 $t_a = 4h$,制备出 1310 nm X 切退火质子交换光波导,其条宽为 $6 \mu\text{m}$. 这一工艺仿真点和相应的测量点分别用 $d_c = 0.309 \mu\text{m}$ 和 $t_a = 4h$ 的圆点和“x”点示于图 8. 仿真点和测量点比较接近,其差别可能由断续退火代替连续退火所致. 这一退火质子交换光波导的插入损耗测量值为 2.4 dB ,可分解为 2 dB 耦合损耗、 0.2 dB 反射损耗和 0.2 dB 传播损耗. 一个界面的耦合损耗 1 dB ,与束传播方法的模拟计算值相符. 这一光波导近场的红外照相照片示于图 9,其光斑尺寸接近 $1.3 \mu\text{m}$ 单模光纤光斑尺寸 $\sim 9 \mu\text{m}$.

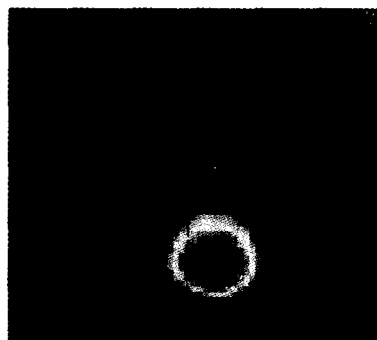


图 9 退火质子交换条形光波导近场照片

Fig. 9 The near field photograph of annealing-exchange strip wave guide

综上所述,本文对 X 切 H: LiNbO₃ 光波导进行了系统的工艺仿真研究,研究结果可供低损耗 α 相单模波导的制备和设计参考.

最后感谢杜天敏、司磊、徐建营、张玉丹、王红飞和张海廷在条形波导的制备和测量过程中给予的帮助.

参考文献

- 1 张德龙,丁桂兰,崔宇明,等. 质子交换 LiNbO₃ 光波导. 物理学进展,2001,21(1):45~65
Zhang D L, Ding G L, Cui Y M, et al. Progress in Physics,2001,21(1):45~65
- 2 Goto N, Yip G L. Characterization of proton-exchange and annealed LiNbO₃ waveguides with pyrophosphoric acid. Applied Optics,1989,28(1): 60~65
- 3 Kolopoulos J N, Yip G L. Accurate modeling of the index profile in annealed proton-exchanged LiNbO₃ waveguides. SPIE,1991,1583,71~82
- 4 Korkishko Y N, Fedorov V A, Demicheli M P, et al. Relationship between structural and optical properties of proton-exchanged waveguide on z-cut Lithium niobate. Appl Opt,1996,35(36):7056~7060

Technical Modeling of X-cut H : LiNbO₃ Optical Waveguides

Huang Tao¹, Jin Feng^{1,2}, Liu Fumin¹, Xu Yuxin¹

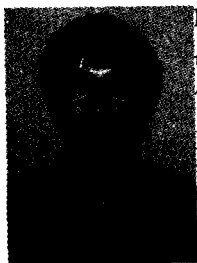
¹ China Academy of Aerospace Times Electronics Corporation, Beijing 100854

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy, Changchun

Received date: 2004-05-31

Abstract Technical modeling of x-cut H : LiNbO₃ optical waveguides is researched by prism coupler at the wavelength of 532 nm and 1310 nm. For optical waveguides proton-exchanged in pure benzoic acid at 150°C, 180°C and 200°C, relationships between exchanged thickness and exchanged time are given, respectively, and on this base, a relation curve of diffusion coefficient of proton-exchange to exchanged temperature is plotted. For the waveguides proton-exchanged at 180°C and annealed at 350°C, the changes of surface refractive index increment and effective thickness with annealing time are obtained. The results can be used to design and fabricate the low loss α phase single mode waveguides.

Keywords LiNbO₃; Optical waveguide; Proton-exchange; Annealing



Huang Tao was born in September 1978, in Fujian Province, China. In 2001, He received the B. S. degree from Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology. He is doing a research on integrated optical modulator as a R&D Engineer in Lab of Integrated Optics of China Academy of Aerospace Times Electronics Corporation.