

文章编号: 0258-7025(2004)06-0665-04

两步离子交换低损耗光波导功分器的研制

周自刚^{1,2}, 刘德森¹

(¹ 西南师范大学光电所, 重庆 400715; ² 苏州大学理学院物理系, 江苏 苏州 215006)

摘要 报道了在热扩散条件下两步离子交换玻璃光波导功分器的理论分析、样品制作和实验测试。为了便于定量分析,采用了一种上升反正弦 S 型分支光波导系统的物理模型,得到了在热扩散条件下两步离子交换光功分器波导区的归一化折射率分布和在不同交换时间所形成的玻璃波导折射率分布。在此基础上,设计和制作出第一步采用含 Ti^{+} 纯熔盐 Ti_2SO_4 与玻璃含 Na^{+} 进行离子交换形成表面下半圆形波导,再把该波导表面脱钛膜放入含 Na^{+} 熔盐 $NaNO_3$ 中进行第二步离子交换形成掩埋式圆形波导光功分器,实现插入损耗为 0.15 dB 和分光比为 50:50 的上升反正弦 S 型玻璃光波导功分器。

关键词 导波光学;离子交换;光功分器;玻璃波导;低损耗;上升反正弦

中图分类号 TN 252;TN 256 **文献标识码** A

Two-Step Ion-Exchanged Waveguides Splitter with Low-Loss

ZHOU Zi-gang^{1,2}, LIU De-sen¹

(¹ Institute of Optoelectronics, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China)
(² Department of Physics, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A detailed experiment and a theoretical analysis of two-step ion-exchanged glass optical power splitter are reported. In order to facilitate quantitative analysis, a rational model of physics for a rise inverse sine structure of 1×2 S-branch power splitter in glass is proposed. In thermal ion exchange, the distribution of normalized refractive index of two-step ion-exchanged optical power splitter and the distribution of splitter refractive index of different exchange time have been gotten. On this basis, these surface half-round channel waveguides are fabricated by first performing a thermal Ti^{+} exchange in melt Ti_2SO_4 through a mask patterned on the glass surface. The resulting surface channel waveguides are then buried by second thermal Na^{+} exchange, unmasked ion exchange, in melt $NaNO_3$. In this step the Ti^{+} ions migrate from the glass, and the waveguides are buried below the glass surface. A optical power splitter of insertion loss 0.15 dB and coupling ratio 50:50 has been realized.

Key words guidewave optics; ion-exchanging; optical power splitter; glass waveguide; low loss; rise inverse sine

1 引言

离子交换玻璃光波导器件以其损耗小、折射率及模场分布与光纤匹配良好、光损伤小、制作工艺简单、成本低、便于集成化等优点而在诸多形式(如光纤型, Ti 扩 $LiNbO_3$ 波导型等无源器件)中显示其独具特色的生命力,愈来愈为人们瞩目。在所有能够在玻璃内部与一价离子进行交换中, Ti^{+} 和 Na^{+} 的半径之差和极化率同时最大,虽然 Ti^{+} 具有剧毒,

但只是在气态,如果在液态和固态进行离子交换是不会有毒性的^[1]。本文从理论上分析了不同条件下离子交换光波导的折射率分布,从而给出了制作时选择工艺条件的依据。同时实验设计了 Ti^{+} - Na^{+} 离子交换上升反正弦 Y 型光波导功分器。

2 离子交换光波导折射率的理论分析

在玻璃的结构中,由于其网络修饰与网络的结

收稿日期:2003-03-21;收到修改稿日期:2003-05-06

基金项目:重庆市科委应用基础研究(编号:2002-7319)资助项目。

作者简介:周自刚(1973—),男,西南师范大学讲师,博士,主要从事波导器件研究。E-mail: zigzhou@163.net

合是不牢固的,因此,当加热浸在某熔盐中的玻璃,使其内离子具有一定能量时,离子极容易在网格之间发生迁移,与熔盐中的一价离子在玻璃表面处发生交换,这种新的离子与玻璃中的金属离子互扩散所形成的离子交换与材料的折射率、摩尔体积、材料内粒子的电极化率、内部应力、温度等因素有关。伴随离子交换会引起折射率的改变,这是由于两种交换离子的半径不同,使交换处体积发生改变而引起的,如果以熔盐中半径较小的离子替代玻璃中半径较大的离子,交换后玻璃网格在小离子的周围发生溃塌,产生比离子交换前更密集的结构,这样将导致折射率的增加;再是由于离子交换使电子位移极化率发生改变而引起的,如用电子位移极化率较大的 Tl^+ 离子替代电子位移极化率较小的 Na^+ 离子,则也会使折射率增加;此外,由于交换离子半径不同,必然引起交换处的摩尔体积改变,但因玻璃是网格结构,体积的膨胀(或缩小)是各向异性的,从而造成交换层内部压强的增加(或缩小),致使折射率发生改变,我们正是利用了上述各因素在离子交换处造成折射率的变化而制成了光波导^[2]。

在波导形成过程中,交换离子受到由浓度梯度引起的化学势的作用和受到玻璃基片中交换离子的运动速度的影响,形成内建电场和外电场的作用,从而可推出交换离子浓度 C 的精确表达式为^[3]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{1-\alpha C} \left[\nabla^2 C + \frac{\alpha(\nabla C)^2}{1-\alpha C} - \frac{eE_{\text{ext}}}{kT} \nabla C \right] \quad (1)$$

式中, D 为 Tl^+ 扩散系数; α 为 Tl^+ 离子迁移差率; E_{ext} 为外加电场; k 为玻尔兹曼常数。由于在离子交换过程中,玻璃基片浸于熔融 Tl_2SO_4 溶液中,基片和溶液空间都远大于波导尺寸,可认为此期间 Tl_2SO_4 溶液浓度为常量,视为恒量扩散源,另外,与波导相比,可将玻璃基片看成无穷大空间,令玻璃基片表面归一化浓度为 1,基片中远离波导区处浓度为零。依此,设定初始条件和边界条件,对宽度 $d = 4 \text{ mm}$ 的波导,选取波导的纵向 x , 横向 y 方向上的 51×51 点阵, $\Delta x = \Delta y = 0.8 \text{ } \mu\text{m}$ 可得到离子交换的差分形式

$$\frac{C_{ij}^{K+1} - C_{ij}^K}{\Delta t} = \frac{D}{h^2(1-\alpha C_{ij}^K)} \times \{ C_{i+1,j}^K + C_{i-1,j}^K + C_{i,j+1}^K + C_{i,j-1}^K - 4C_{ij}^K + \frac{\alpha}{1-\alpha C_{ij}^K} [(C_{i+1,j}^K - C_{ij}^K)^2 + (C_{i,j+1}^K - C_{ij}^K)^2] \} \quad (2)$$

$(i = 2, 3, \dots, 51 \quad j = 2, 3, \dots, 51)$

边界条件和初始条件的差分形式分别为

$$\begin{cases} C_{ij}^K = 1 & (i = 1, j = 1, \dots, 17) \\ C_{ij}^K = C_{i+1,j}^K & (i = 1, j = 18, \dots, 51) \\ C_{ij}^K = 0 & (i = 51 \text{ 或 } j = 51) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_{ij}^K = 1 & (i = 1, j = 1, \dots, 17) \\ C_{ij}^K = 0 & (i = 1, j = 18, \dots, 51) \\ C_{ij}^K = 0 & (i = 51 \text{ 或 } j = 51) \end{cases} \quad (4)$$

对公式(2)~(4)编程计算,得两步离子交换波导归一化交换离子浓度随光波导深度 l 的分布,如图 1 所示。

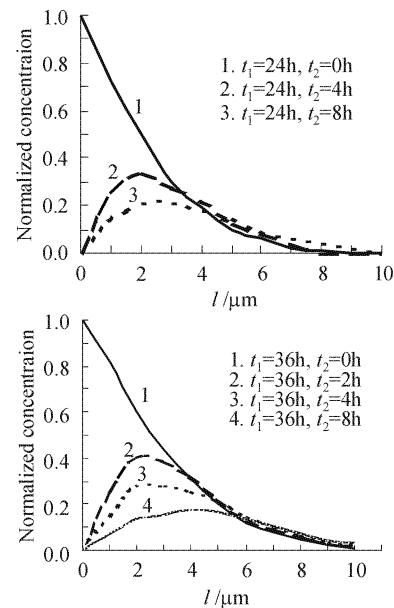


图 1 两步离子交换波导沿深度 l 的归一化交换离子浓度分布曲线

Fig. 1 Normalized exchanged ion concentration spread of waveguide along the two ion-exchanged depth l

经过不同时间的离子交换后能形成折射率按二维分布,如图 2 所示。 $\alpha = 0.01, D = 1.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{h}$ ^[4],图 2(a)和(c)显示了对于一次离子交换用不同交换时间,所形成的 Tl^+ 离子在 x, y 平面不同浓度深度 l 分布的表面波导,图 2(b), (d), (e), (f) 显示了在一次离子交换形成的表面波导基础上,进行第二步离子交换形成的掩埋波导。

上述结果在求解过程中未作近似化简,因此准确性较高,有良好的收敛性,结果对所有非辅助电场两步离子交换均适用,具有通用性。图 2 指出,选取适当的交换时刻,经两步离子交换后可获得较为理想的与光纤模场匹配的单模波导。

3 器件的制作及测试结果

所做的器件是以 BK-7 玻璃为衬底,进行 Tl^+

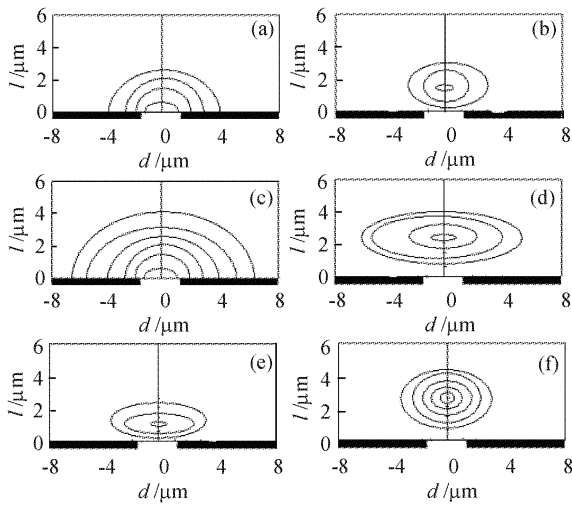


图 2 不同离子交换时间形成的波导折射率分布

Fig. 2 Refractive index spread of waveguide

for different exchange time

- (a) $t_1 = 8 \text{ h}$, $t_2 = 0 \text{ h}$; (b) $t_1 = 8 \text{ h}$, $t_2 = 2 \text{ h}$;
 (c) $t_1 = 16 \text{ h}$, $t_2 = 0 \text{ h}$; (d) $t_1 = 16 \text{ h}$, $t_2 = 3 \text{ h}$;
 (e) $t_1 = 16 \text{ h}$, $t_2 = 5 \text{ h}$; (f) $t_1 = 24 \text{ h}$, $t_2 = 6 \text{ h}$

Na^+ 二次离子交换制得的 Y 型光波导。用 Tl^+ - Na^+ 离子交换的设计思想是, Tl^+ 离子在玻璃中稳定性较好, 扩散系数很小, 引起折射率的改变范围是 0.001~0.1, 又由于交换速度较慢, 因此易于控制交换时间, 获得与单模或多模光纤相匹配的和插入损耗低的离子交换波导, 器件的制作过程简述如下。

1) 真空镀膜机在抛光好的 BK-7 玻璃上蒸钛 (厚度约为 $1\sim 3 \mu\text{m}$);

2) 利用 BPM 软件设计上升反正弦 Y 型玻璃母板;

3) 在蒸发好钛膜的基片上, 用紫外线光照、腐蚀和刻蚀等工艺, 按设计制作波导窗口;

4) 进行 Tl^+ - Na^+ 一次离子交换, 即将光刻好的基片置于 480°C 的 Ti_2SO_4 晶体中, 交换时间 24 h, 如此可获得表面波导;

5) 进行两步离子交换 Na^+ - Tl^+ 离子反扩散, 该步骤的目的可从图 2 看出, 是为了制作成掩埋波导, 使波导与光纤模场匹配, 从而降低器件的插入损耗。将第一步离子交换完成的玻璃波导经清洗后置于熔融 NaNO_3 熔液中, 交换时间可视对掩埋波导深度的要求而定, 一般较第一步离子交换时间短得多;

6) 对器件输入、输出端面进行抛光, 并作通光检查, 对通光性能良好的样品即表示获得了完整的 Y 型光波导, 从而可进行后续工艺制作。

采用 BPM 软件设计上升反正弦 S 形波导图案^[5], 如图 3 所示, 其中 h 取 $125 \mu\text{m}$, l 取 $800 \mu\text{m}$ 。把制作好的 1×2 光功分器元件进行光路测试, 如图 4 所示。

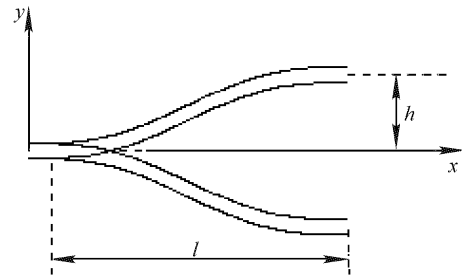


图 3 S 形弯曲玻璃波导 Y-分支结构

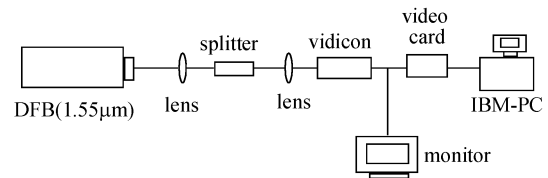
Fig. 3 Structure of 1×2 Y-branch power splitter in glass

图 4 功率测试系统

Fig. 4 Test system of optical power splitter

在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下测得上述 1×2 光功分器的插入器件前后光路终端输出功率 I_b 及 I_a 和插入损耗 η 如表 1, 其中

$$\eta = -10 \lg \frac{I_a}{I_b}$$

表 1 1×2 光功分器的输出功率及插入损耗测试结果

Table 1 Outpower and access loss of optical power splitter		
$I_b / \mu\text{W}$	$I_a / \mu\text{W}$	η / dB
0.402	0.39	0.13
1.294	1.25	0.15

4 结 论

将测试结果与具有同样结构尺寸的 Ti 扩 LiNbO_3 Y 型光功分器相比较^[6], 也用图 3 的测试光路测试, 后者插入损耗为 1.2 dB, 可见所做的 Tl^+ - Na^+ 离子交换器件的插入损耗要比 Ti 扩 LiNbO_3 器件小 1.0 dB, 使集成光路的这一关键参数得到了较大的改善, 若能在工艺上进一步改进, 如使铝窗口边缘更平滑, 以减小波导的传输损耗; 对波导端面抛光, 使垂直度、光洁度更高, 以减小耦合损耗等, 那么, 可望获得插入损耗更低的离子交换光波导器件。

参 考 文 献

- 1 R. V. Ramaswamy, R. Srivastava. Ion-exchanged glass waveguides; a review [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 984~1002
- 2 S. D. Fantone. Refractive index and spectral models for gradient-index materials [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(3):432~440
- 3 A. N. Miliou, R. Srivastava, R. V. Ramaswamy. Modeling of the index change in K^+-Na^+ ion-exchanged glass [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(6):674~681
- 4 Liu Desen, Yin Zongming, Zhu Shunlai *et al.*. Fiber Optics [M]. Beijing: Science Press, 1987. 198~204
刘德森,殷宗敏,祝顺来等. 纤维光学[M]. 北京:科学出版社, 1987. 198~204
- 5 Zhou Zigang, Liu Desen. Refractive index profiles of two-step ion-exchange glass splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6):694~696
周自刚,刘德森. 两步离子交换玻璃光功分器的折射率分布[J]. 光学学报, 2003, **23**(6):694~696
- 6 Cai Borong. Integrated Optics [M]. Chengdu: Electronic Science and Technology University Publishing House, 1990. 143~144
蔡宝荣. 集成光学[M]. 成都:电子科技大学出版社, 1990. 143~144

激光二极管抽运的 $1.54 \mu\text{m}$ 钕玻璃被动调 Q 激光器*

1.54 μm 钕玻璃激光器具有体积小、成本低、效率高、结构简单、光束质量好、对人眼安全等特点。其调 Q 激光运转在人眼安全激光测距、激光制导等领域有着极好的应用前景。国外在 20 世纪 90 年代初开始了这方面的研究工作^[1]。在国内,本课题组和中国科学院上海光学精密机械研究所相继报道了 LD 抽运的连续钕玻璃激光器^[2~4],我们对调 Q 运转作了进一步的研究,采用波长为 973 nm 的国产 1 W 半导体激光器为光源,采用平凹腔结构,整个谐振腔长度小于 5 mm。激光介质为厚度 1 mm 的 Er/Yb 共掺的玻璃(Er 离子掺杂浓度约 1%),以 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体(厚度 1 mm)作为被动调 Q 材料,在吸收的抽运功率为 500 mW 时,实现了重复频率约为 800 Hz,脉冲宽度为 7.4 ns,平均功率为 13.3 mW,峰值功率达 2.2 kW 的调 Q 激光输出。用带宽为 500 MHz 的示波器可以得到相当稳定的频率和激光输出。

参 考 文 献

- 1 P. Laporta, S. De Silverstri, V. Magni *et al.*. Diode-pumped cw bulk Er:Yb:glass laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24):1952~1954
- 2 Liu Zhuping, Dai Shixun, Hu Lili *et al.*. Study on spectroscopy Yb^{3+} and Er^{3+} co-doped phosphate glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5):467~470
柳祝平,戴世勋,胡丽丽等. Yb^{3+} , Er^{3+} 共掺磷酸盐钕玻璃光谱性质研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(5):467~470
- 3 Song Feng, Chen Xiaobo, Feng Yan *et al.*. Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass laser pumped by LD [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(9):790~792
宋峰,陈晓波,冯衍等. LD 泵浦的共掺 Er^{3+} , Yb^{3+} 磷酸盐玻璃激光器[J]. 中国激光, 1999, **A26**(9):790~792
- 4 Meng Fanzhen, Song Feng, Zhang Caobo *et al.*. Laser diode pumped 1.54 μm Er:Yb:phosphate glass continuous wave compact laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(10):1739~

南开大学物理学院,天津 300071

宋峰,吴朝辉,孟凡臻,

张潮波,田建国,张光寅

收稿日期:2004-01-16

* 教育部优秀青年教师资助计划和国家自然科学基金(编号:60377033,60025512)资助项目。