

文章编号: 1001-3806(2010)06-0828-04

Y分支3维光波导横截面折射率分布

王强, 周自刚*, 孙光春, 杨永佳
(西南科技大学理学院, 绵阳 621010)

摘要: 为了实现一个表达式同时反映Y分支光波导在纵横两方向上的折射率分布, 通过对玻璃结构和离子交换过程进行分析, 采用逆向分离变量法提出了基于横向和纵向两个方向折射率分布函数乘积的横截面折射率分布函数, 并利用MATLAB软件对优化结果进行了编程模拟。利用 $Tl^+ - Na^+$ 离子交换法在BK₇玻璃基底上制备了Y分支 1×2 型3维光波导, 利用雅明干涉法对光波导横截面的折射率分布进行了测量。结果表明, 利用改折射率分布函数模拟得到的Y分支光波导横截面折射率分布与雅明干涉法实验测得的结果吻合。该改进型折射率分布函数可以对Y分支光波导横截面折射率分布进行模拟, 能准确快捷地对 $Tl^+ - Na^+$ 离子交换Y分支3维光波导横截面折射率分布进行重建。

关键词: 集成光学; Y分支光波导; $Tl^+ - Na^+$ 离子交换; 逆向分离变量法; 折射率分布函数

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.029

Refractive index profiles of Y-branch 3-D optical waveguide in cross-section

WANG Qiang, ZHOU Zi-gang, SUN Guang-chun, YANG Yong-jia

(School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to describe the refractive index profiles of Y-branch waveguide in x and y direction with only one expression, after analyzing the construction of glass substrate and the ion exchange process, an expression based on the product of refractive index distribution functions on the horizontal direction and the vertical direction was put forward by means of inverse variable separation method. Then the refractive index profiles were simulated with MATLAB. A 1×2 Y-branch optical waveguide was fabricated on BK₇ glass substrate by means of $Tl^+ - Na^+$ ion-exchange method, and its refractive-index profiles was measured by means of interference method. The simulated profiles were in good agreement with experimental results. The results show that the refractive-index distribution of Y-branch optical waveguide in cross-section can be reconstructed by the improved function $n(x, y)$ easily.

Key words: integrated optics; Y-branching optical waveguide; $Tl^+ - Na^+$ ion-exchange; inverse variable separation method; refractive index distribution function

引言

在众多光波导制备方法中, 如离子交换法、溶胶-凝胶法、离子注入法和激光直写^[1], 由于离子交换制备有源和无源光器件具有操作方便、成本低廉、传输损耗低以及易与单模光纤匹配等优点, 自1972年以来, 它已成为制备玻璃光波导的重要方法^[2]。随着基于全光网络的信息社会的快速发展, 波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM)^[3]和光功分器^[4]等广泛应用于光通信领域, 光通信器件将向着高集成度和微型化发展。3维光波导可在一个元件上实现光学器件的高集成, 因此, 以Y分支为代表的3维光波导

已引起人们的高度重视, 而波导横截面分布的研究则是光波导理论研究的重点^[5]。

作者利用 $Tl^+ - Na^+$ 离子交换在BK₇玻璃基底上制备了1个Y分支 1×2 型3维光波导, 用雅明干涉法对其横截面折射率分布进行了测量。对Y分支光波导横截面折射率分布函数 $n(x, y)$ 进行了细致的研究, 采用逆向分离变量法建立了基于纵横两方向分布乘积的横截面折射率分布函数, 并利用MATLAB软件对提出的折射率函数进行模拟, 实现了对Y分支3维光波导横截面折射率分布的重建。

1 离子交换理论模型

1.1 离子交换形成光波导理论模型

制备玻璃光波导, 就是制备一个折射率不同于周围折射率的区域。在掩膜型2元($A + B \leftrightarrow \bar{A} + \bar{B}$)离子交换过程中(定义A为向玻璃基底内扩散离子, B为

作者简介: 王强(1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光波导、集成光学理论方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhouzigang1973@163.com

收稿日期: 2009-12-10; 收到修改稿日期: 2010-01-03

向玻璃基底外扩散离子),离子交换只发生在没有掩膜的区域。向内扩散的A离子交换出玻璃基底中的B离子后,交换区域玻璃折射率比未交换区域折射率高。图1为掩膜型离子交换制备光波导的示意图。

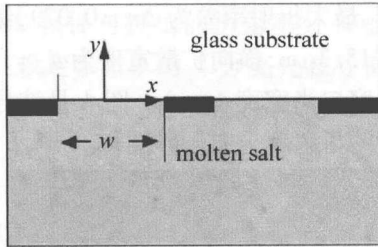


Fig. 1 Schematic representation of ion-exchange process

1.2 离子交换动力学原理

玻璃基底主要由SiO₂和其它一系列氧化物组成,其中的1价阳离子氧化物Na₂O, K₂O, Li₂O等被称为网络修饰体。对于大多数的硅酸盐型氧化物玻璃来说,玻璃基底的基本结构在离子交换前后不发生变化,且仅有一种碱性1价阳离子在交换离子浓度梯度作用下发生交换^[6]。玻璃折射率和玻璃的化学成分有密切关系,可用如下公式表示玻璃基底折射率和交换入玻璃中的离子浓度的关系^[7]:

$$n(x, y, z, t) = kc(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中,系数k为实数,它的取值与玻璃基底结构,交换熔盐离子浓度及离子交换温度等参量有关。玻璃基底折射率的改变量与交换离子半径,组成离子电极化率以及熔盐-玻璃界面处离子交换程度等诸多因素有关。在离子交换达到平衡状态,熔盐和瞬间进入玻璃表面的A离子浓度有如下关系^[8]:

$$\ln\left(\frac{m_A}{m_B}\right) - \frac{E}{RT}(1 - 2m_B) = n \ln\left(\frac{C_A}{C_B}\right) - \ln K \quad (2)$$

式中, m_A 和 m_B 分别为A离子和B离子的摩尔分数, E 为熔盐中A, B两种阳离子净相互作用能, R 是气体常数, T 是绝对温度, $K = a_B C_A / a_A C_B$, $n = \ln a_A / \ln C_A$ 均为与交换玻璃基底结构有关的热力学常数,其中 a 是阳离子热力学系数, $C_A = c_A / c_0$ 和 $C_B = c_B / c_0$ 分别为玻璃基底内A离子和B离子归一化浓度(即相对离子浓度), c_A 和 c_B 分别为玻璃基底内A离子和B离子的浓度, $c_0 = c_A + c_B$ 为玻璃基底内总离子浓度。

2 Y分支光波导折射率分布模型

2.1 2元离子交换扩散方程

2元(如Tl⁺-Na⁺)离子交换系统内,玻璃基底含有两种单价阳离子:内扩散离子(Tl⁺)和外扩散离子(Na⁺)。有两个力作用于扩散离子:一是扩散离子的浓度梯度,另一个是离子交换过程中的局部电场引起的离子漂移。该电场由外加电场(E_{ext})和由于交换离

子迁移率不同而形成的局部内建电场两部分组成^[9]。对于扩散离子的扩散行为可用Fick定理描述,扩散离子浓度随时间的变化由如下扩散方程表示^[10]:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{D_A}{1 - \alpha C_A} \left[\nabla^2 C_A + \frac{\alpha (\nabla C_A)^2}{1 - \alpha C_A} - \frac{e E_{ext} \nabla C_A}{kT} \right] \quad (3)$$

式中, $C_A = c_A / c_0$ 是A离子(Tl⁺)的归一化浓度, c_A 是A离子(Tl⁺)浓度, c_0 为Tl⁺, Na⁺总离子浓度, $\alpha = 1 - D_A / D_B$, D_A 和 D_B 分别是A离子、B离子的自扩散系数, $D_A / (1 - \alpha C_A)$ 是互扩散系数,当自扩散系数之比 M ($M = D_A / D_B$) 取值较小时,互扩散系数与浓度紧密相关^[11]。(3)式中右边括号内3项分别表示浓度梯度,局部内建电场和外加电场引起的离子扩散行为。

2.2 离子交换Y分支光波导折射率分布函数模型

利用两步离子交换技术可以实现Y型表面波导的掩埋,从而降低传输损耗和表面散射损耗,同时,利用波导掩埋后的空气-玻璃界面也可以很好地保护波导区域。利用两步离子交换制备的掩埋型光波导,其折射率改变量的范围可以从0.0001到0.1,传输损耗也只有0.1dB/cm^[12]。

利用离子交换法在BK₇玻璃基底上制备的沟道光波导在水平方向(x 方向)上的折射率分布函数 $n(x, t)$ 可以用下式表示^[13]:

$$n(x, t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\frac{w}{2} - x}{2 \sqrt{D_{eff} t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{w}{2} + x}{2 \sqrt{D_{eff} t}} \right) \right] \quad (4)$$

式中, w 是离子交换的窗宽度, D_{eff} 为有效扩散系数。

而在竖直方向(y 方向)上的折射率分布函数 $n(y, t)$ 则可用另一表达式来描述^[14]:

$$n(y, t) = \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2 \sqrt{D_{eff} t}} \right) \quad (5)$$

式中, $\operatorname{erf}(x)$ 和 $\operatorname{erfc}(x)$ 分别为误差函数和余误差函数。

由Zachariaron无规则网络理论可知,玻璃属于非晶体,具有各向同性,因此,在离子交换过程中,可认为在一个方向上的离子交换不会受到另一方向上离子交换的影响^[15]。根据分离变量法思想,当一个函数含有多个自变量,且其中的各个自变量相互之间无关时,可以采用各个自变量函数的乘积来表示这个函数,再进行处理,所得结果与直接对原函数进行处理的结果一样。同理,为了表示横截面上纵横两个方向上的折射率分布,而 x 和 y 两方向上的离子交换过程彼此无影响,就可以采用逆向分离变量的方法将横截面上的折射率分布表示成两个垂直方向(x 方向和 y 方向)上折射率分布函数的乘积。因此,提出利用基于纵横两方

向上的误差函数和余误差函数来表示 Y 分支 3 维光波导在横截面上的折射率分布:

$$n(x, y, t) = n_s + (\Delta n) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\frac{w}{2} - x}{2\sqrt{D_{\text{eff}}t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{w}{2} + x}{2\sqrt{D_{\text{eff}}t}} \right) \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{d_s} \right) \quad (6)$$

式中, n_s 是玻璃基底的折射率, Δn 是玻璃基底表面折射率改变量, d_s 为 Y 分支 3 维光波导在垂直方向上的扩散深度, t 是离子交换总时间, 定义 $D_{\text{eff}} = 2D_{\text{Tl}^+} / (M + 1)$ 为有效扩散系数 (D_{Tl^+} 为 Tl^+ 的自扩散系数, M 为自扩散系数之比)。

3 模拟与实验

3.1 横截面折射率分布的 MATLAB 模拟

为了验证上式反映 $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换制备 Y 分支 3 维光波导横截面折射率分布的准确性, 将前面提出的横截面折射率分布函数 (6) 式编程, 并利用 MATLAB 软件对交换入玻璃基底中的 Tl^+ 在横截面上的浓度分布进行模拟。模拟参量分别为: $M = 0.02$, $D = 2.4 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$, $T = 530^\circ\text{C}$, $w = 8 \mu\text{m}$, $n_s = 1.512$ (激光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$), $\Delta n = 0.08$ 。图 2 中给出了当窗口宽度 $w = 8 \mu\text{m}$ 、交换时间为 $t = 30 \text{ h}$ 时玻璃基底上波导区域折射率分布的理论模拟图。

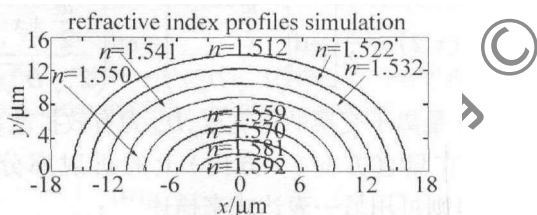


Fig. 2 The refractive index profile of Y-branch waveguide in cross-section

3.2 $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换制备 Y 分支 3 维光波导实验

由于 Tl^+ 比 Ag^+ 具有更好的化学稳定性, 比 K^+ 具有更理想的离子交换半径, 比 Cs^+ 更能获得大折射率改变量, 且能避免玻璃基底的破裂, 因此, 选择 Tl^+ 做为交换离子。同时, 选取富含 Na^+ 的 BK_7 玻璃作为玻璃基底, 利用 $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换技术在 BK_7 玻璃基底上制备出了如图 3 所示的 1×2 型 Y 分支光波导, 其中交换时间 $t = 30 \text{ h}$, 离子交换窗口宽度为 $w = 8 \mu\text{m}$ 。



Fig. 3 1×2 Y-branch optical waveguide formed by $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ ion exchange

玻璃折射率的改变量与离子交换后掺入玻璃基底中 Tl^+ 浓度成正比, 因此, 可以通过测定掺杂离子浓

度来反映玻璃基底折射率变化情况^[16]。采用雅明干涉法对 Y 分支光波导在横截面处折射率分布进行了测试。所得测试结果主要数据参量如下: 光波导中 a , b 两点表面中心处 (见图 3) 折射率即最大折射率 $n_{\text{max}} = 1.591$, 最大折射率差为 $\Delta n = 0.079$, 纵向最大扩散深度 $d_s = 13.3 \mu\text{m}$, 横向扩散宽度为 $d_x = 17.1 \mu\text{m}$ (包括离子交换窗口半宽度 $4 \mu\text{m}$)。图 4 是波导中 a , b 不同两点处的等折射率分布干涉图样。



Fig. 4 The interference patterns of 1×2 Y-branching $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange waveguide

3.3 结果与分析

图 2 中给出了利用 MATLAB 软件对作者提出的离子交换后 Y 分支光波导横截面折射率分布函数编程模拟的结果, 图 4 反映的是利用雅明干涉法对制备的 $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换 1×2 型 Y 分支光波导不同两点横截面折射率干涉图样。从这两张图可以看出, 利用所提出的 Y 分支光波导横截面折射率分布函数得到的模拟结果与实验室测得的实验结果相当吻合, 所以, 该改进型折射率分布函数 $n(x, y, t)$ 可以用来描述玻璃基底内离子浓度分布, 也可以利用作者提出的改进折射率分布函数 $n(x, y, t)$ 通过 MATLAB 软件编程, 准确重建 $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换后 Y 分支光波导横截面折射率分布。

4 结论

通过对热离子交换中玻璃基底结构、离子扩散行为以及离子交换后波导区域横截面折射率分布规律的研究, 利用分离变量法思想, 采用逆向分离变量方法, 提出利用横纵两个方向上的折射率分布函数的乘积来

表示光波导横截面折射率分布函数,该乘积型折射率分布函数适用于 Tl^+-Na^+ 离子交换后Y分支3维光波导横截面折射率分布。该函数只用1个表达式就能同时反映Y分支光波导横截面整个折射率分布情况。利用MATLAB软件对提出的折射率分布函数进行编程,得到了在设定参量下的Y分支光波导横截面的模拟结果。利用 Tl^+-Na^+ 离子交换在BK₇玻璃基底上制备了1个Y分支1×2型3维光波导,并利用雅明干涉法对波导横截面折射率分布进行了测试。通过对理论模拟结果和实验测试结果的比较后发现,两者符合得很好,因此,采用逆分离变量法提出的乘积型折射率分布函数是正确的。该折射率分布函数 $n(x,y,t)$ 完全可以准确快捷地重构离子交换后Y分支光波导横截面折射率分布。

参 考 文 献

- [1] LI A K, WANG Z M, LIU J J, *et al.* Direct laser writing of strip waveguide in sol-gel film[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3):317-319(in Chinese).
- [2] TATSUO I, HIROSHI N. Optical waveguide formed by electrically induced migration of ions in glass plate[J]. *A P L*, 1972, 21(12):584-586.
- [3] KE Ch J, LIU D M, HUANG D X. Experimental investigation on novel dense wavelength division demultiplexer[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4):398-401(in Chinese).
- [4] ZHOU Z G. Low-loss glass waveguide optical power splitter by two-step ion-exchange technology[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5623:583-586.
- [5] LIN D Y, FANG J Y. The research for refractive-index profile of optical waveguide formed by Li-Na ions exchange[J]. *Journal on Communications*, 1983, 10(4):59-67(in Chinese).
- [6] ZHOU L B, LUO F G, CAO M C. The independence burial-depth ion-exchanged glass waveguides and their applications[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5623:981-986.
- [7] GAO Y J, DONG Y, QIU F, *et al.* Refractive index profiles of Ag-Na ion-exchange glass waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8):1507-1510(in Chinese).
- [8] LI C Y, WINICK K A, GRIFFIN H C, *et al.* Systematic modeling study of channel waveguide fabrication by thermal silver ion exchange[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(8):1743-1755.
- [9] MADASAMY P, WEST B R, MORRELL M M, *et al.* Buried ion-exchanged glass waveguides: burial-depth dependence on waveguide width[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13):1132-1134.
- [10] ALBERT J, JOHN W Y. Full modeling of field-assisted ion exchange for graded index buried channel optical waveguides[J]. *Appl Opt*, 1990, 29(18):2798-2804.
- [11] ZHOU Z G. Semicircular waveguide dependence on exchange-time and line breadth[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5644:65-69.
- [12] GIALLORENZI T G, WEST E J, KIRK R, *et al.* Optical waveguides formed by thermal migration of ions in glass[J]. *Appl Opt*, 1973, 12(6):1240-1245.
- [13] CHADHA D. Simplified universal dispersion curves for channel waveguides[J]. *Opt Commun*, 1997, 140(4/6):207-210.
- [14] SAARIKOSKI H, SALMIO R P, SAARINEN J, *et al.* Fast numerical solution of nonlinear diffusion equation for the simulation of ion-exchanged micro-optics components in glass[J]. *Opt Commun*, 1997, 134(1/6):362-370.
- [15] de ALMEIDA J M M M. Design methodology of annealed H⁺ waveguides in ferroelectric LiNbO₃[J]. *Opt Engng*, 2007, 46(6):064601/1-064601/13.
- [16] SHAO G W, JIN G L. Modeling of graded index waveguide fabricated by ion exchange on Er³⁺ doped glass[J]. *Chinese Physics*, 2009, B18(3):1096-1104.

(上接第811页)

- [2] WEISBUCH G, GARBA Y F. Light scattering by surface tension waves[J]. *Amer J Phys*, 1979, 47(4):355-356.
- [3] KLIPSTEIN W M, RADNICH J S, LAMOREAUX S K. Thermally excited liquid surface waves and their study through the quasielastic scattering of light[J]. *Amer J Phys*, 1996, 64(6):758-765.
- [4] ZHU F, LUO Y J, XUE Y P, *et al.* Laser diffraction from capillary waves in conditions of oblique incidence[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(6):847-850(in Chinese).
- [5] MIAO R C, ZHU F. Study on thickness measurement for liquid film by means of laser diffraction[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5):537-539(in Chinese).
- [6] QI J X, MIAO R C, DONG J. Measurement of damping constant of liquid surface wave at low frequency by light diffraction method[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):496-539(in Chinese).
- [7] MIAO R C, YANG Z L, ZHU J T, *et al.* Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction[J]. *A P L*, 2002, 80(17):3033-3035.
- [8] LUO D B, MIAO R C, LIU X L, *et al.* Study on diffraction and damping characteristics of low frequency liquid surface waves[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6):584-586(in Chinese).
- [9] LIU X L, MIAO R C, LUO D B, *et al.* The asymmetrical distribution of diffraction patterns from liquid surface waves[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6):590-592(in Chinese).
- [10] BARIK T K, ROY A, KAR S. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves[J]. *Amer J Phys*, 2005, 73(8):725-729.
- [11] BARIK T K, CHAUDHURI P R, ROY A, *et al.* Probing liquid surface waves, liquid properties and liquid films with light diffraction[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(6):1553-1562.
- [12] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics[M]. Beijing: Science Press, 1976:77-80(in Chinese).
- [13] LU N G. Fourier optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006:65-116(in Chinese).
- [14] ZHU F, MIAO R C, XU Ch L, *et al.* Measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser diffraction[J]. *Amer J Phys*, 2007, 75(10):896-898.