

文章编号:1004-4213(2011)12-1785-4

# K-Na 离子交换单模平面波导的制备及其表征

鲁庆,夏洪运,郑杰

(集成光电子学国家重点联合实验室(吉林大学实验区),吉林大学电子科学与工程学院,长春 130012)

**摘 要:**通过 K-Na 离子交换技术制备了多模玻璃平面波导.采用棱镜耦合技术测量了波导的有效折射率,用 IWKB 方法拟合得到 K-Na 离子交换波导的折射率分布符合高斯分布,由色散曲线得到单模波导的制备条件(即扩散深度范围),从而得出单模波导的离子交换时间范围,制备出单模波导,并通过求解 WKB 色散方程得出单模波导的表面折射率.用普通数码相机,通过对离子交换平面玻璃光波导传输线进行数字成像,根据传输线上的光强分布拟合出光强传输衰减曲线,计算出单模波导的传输损耗大约为 0.4 dB/cm.

**关键词:**离子交换;单模玻璃光波导;IWKB 法;折射率分布;传输损耗

**中图分类号:** TN252

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114012.1785

## 0 引言

随着集成光学技术的发展,人们对光波导的研究越来越深入.在众多种类的光波导中,玻璃衬底的价格比较廉价,玻璃光波导的折射率与光纤很接近,适宜与光纤的耦合.选择合适的工艺,可以制得低损耗、能承受高功率密度的玻璃光波导.在诸多的光波导制备技术中,离子交换是制作玻璃光波导的重要技术手段<sup>[1]</sup>.在各种离子交换工艺中,K-Na 离子交换扩散速度小、易于控制、重复性好、成本低廉,制备的玻璃波导传输损耗低、折射率及模场分布与光纤匹配良好、便于集成,并且有较高的双折射,在光通信和光学传感等领域有着广阔的应用前景.尽管大多数离子交换波导的研究都致力于实现掩埋型波导<sup>[2]</sup>,但是在离子交换玻璃波导传感器的应用方面有时仍然需要非掩埋型波导<sup>[3]</sup>.离子交换玻璃光波导的制备过程虽然简单,但是对已制成光波导的参量测量和质量评估却相对比较复杂,而离子交换平面光波导参量(如折射率分布、传输损耗等)的确定和了解是筛选玻璃衬底和进一步设计与优化器件的基础.

在分析非掩埋型离子交换玻璃平面波导折射率分布时,最常用的方法是 White 和 Heidrich 提出的 IWKB<sup>[4-5]</sup>法(Inverse Wentzel-Kramers-Brillouin method, IWKB),但这种方法要求(在某一波长情

况下)模式数在 3 个或 3 个以上,无法分析同等条件下单模平面波导的情况.现有的单模平面波导折射率分析方法,有些是通过破坏波导结构来获得的;虽然有些方法不破坏波导结构,但是方法和实验条件却比较复杂,如所用的光束干涉法<sup>[6]</sup>、多波长法<sup>[7]</sup>以及匹配液法<sup>[8]</sup>等;另外,可以采用不同偏振态法进行单模波导折射率分布的分析和拟合,但大多数离子交换单模玻璃平面波导中传输的两个偏振态(TE 和 TM 模式)的有效折射率相差很小,所以此方法多数情况不适用.显然,研究一种简单方便且非破坏性的离子交换单模玻璃平面波导折射率分布<sup>[9]</sup>的确定方法很有必要.本文先通过 IWKB 法确定在一定离子交换温度下制备的多模波导的折射率分布并确定此温度下的扩散系数,假定在此制备温度下缩短交换时间得到的单模波导折射率分布函数不变的情况下确定其扩散深度,并通过求解 WKB 色散方程确定单模波导的折射率分布.

离子交换光波导传输损耗的高低不仅与所选玻璃衬底的质量有关,同时也体现了制备工艺的好坏,对这一波导参量的实时测量,对于评估波导质量和提升制备工艺都很重要,因此简单方便和非破坏性的传输损耗测量方法就显得非常重要.已有的测量光波导传输损耗的方法除了有些具有破坏性外,实验过程也都比较复杂.相比较,数码照相法<sup>[10]</sup>是一种非破坏性的波导传输损耗测试方法,随着数码照

基金项目:国家自然科学基金(No. 60777038)和吉林省科技厅国际合作项目(No. 20070708-3)资助

第一作者:鲁庆(1985-),男,硕士,主要研究方向为集成光学方面的研究. Email:jlulq@163.com

导师(通讯作者):郑杰(1961-),男,博士,博士生导师,主要研究方向为集成光学和光纤器件的研究. Email:zhengjie@jlu.edu.cn

收稿日期:2011-06-27;修回日期:2011-08-16

相技术的不断普及,该方法所用设备也变得越来  
越廉价,实验过程也比较简单.因此,本文将采用普通  
数码相机,通过对离子交换单模平面玻璃波导传输  
线进行数字成像,根据传输线上的光强分布拟合出  
光强传输衰减曲线,计算出波导的传输损耗,该方  
法实验条件简单、准确度较高且不破坏波导结构.

## 1 多模平面波导的制作及各系数确定

在离子交换波导中,单价阳离子氧化物如:  
 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Li}_2\text{O}$  等一般称为网络修正物,在离  
子的二次交换过程中,玻璃的基础结构并没有变化,  
结果只是一种离子被另外一种极化率的离子所代  
替,从而达到改变玻璃折射率的目的,如  $\text{Ag-Na}$  离  
子交换;而  $\text{K-Na}$  离子交换是通过不同半径的离子  
间交换,使玻璃产生应力而改变玻璃的折射率,因此  
该种波导具有某种程度的双折射特性.实验选用英  
国产 Golden Star 牌 Soda-lime 玻璃作为衬底(在  
632.8 nm 波长下,折射率  $n_b = 1.51022$ ,化学组份  
为:wt. %73.55 $\text{SiO}_2$ ,13.86  $\text{Na}_2\text{O}$ , 6.07  $\text{CaO}$ , 3.92  
 $\text{MgO}$ , 1.73  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0.28  $\text{K}_2\text{O}$ , 0.081  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0.51  
 $\text{SO}_3$ +其它).将清洗后的玻璃衬底浸入纯  $\text{KNO}_3$   
熔融熔液中,在 380 °C 的温度下进行离子交换,交  
换时间为 18 h.在 632.8 nm 波长下用棱镜耦合技术  
测量波导样品的有效折射率,所观测到的模式为 4  
个,有效折射率的测试结果见表 1.从表中可以看出  
每阶模式的 TM 模有效折射率均大于相对应的 TE  
模有效折射率,这说明所制备的  $\text{K-Na}$  离子交换波  
导有一定的双折射.

表 1 380 °C 离子交换 18 h 波导的有效折射率

Table1. The refractive indices of waveguides at  
380 °C, 18 h ion exchanged

Modes	0	1	2	3
TE	1.518 01	1.515 23	1.513 51	1.511 92
TM	1.519 14	1.516 23	1.513 82	1.512 05

用 IWKB 方法,针对高斯分布,余误差分布和 e  
指数分布拟合离子交换玻璃波导的 TE 和 TM 模的  
折射率分布,拟合结果如图 1.

由图 1 可以看出,高斯分布的误差最小,为最佳  
拟合.故在以上离子交换实验条件下所制备的玻璃  
平面波导的折射率分布符合高斯分布,可表示为

$$n(x) = n_b + \Delta n \cdot \exp[-(x^2/d^2)] \quad (1)$$

其中,  $\Delta n = n_s - n_b$  为波导的折射率变化,  $n_s$  为波导  
表面折射率,  $n_b$  为玻璃衬底折射率;  $d$  为波导深度.  
波导 TE 模的表面折射率  $n_s = 1.5199$  ( $\Delta n_{\text{TE}} = 0.0097$ )  
波导深度  $d = 8.0 \mu\text{m}$ , TM 模的表面折射率  $n_s =$   
 $1.5215$  ( $\Delta n_{\text{TM}} = 0.0113$ ),波导深度  $d = 7.4 \mu\text{m}$ .由

此可见, TM 模式的折射率变化大于 TE 模式的折  
射率变化.两种偏振条件下所得到的波导深度虽  
有不同但相差不大,在  $8 \mu\text{m}$  左右.

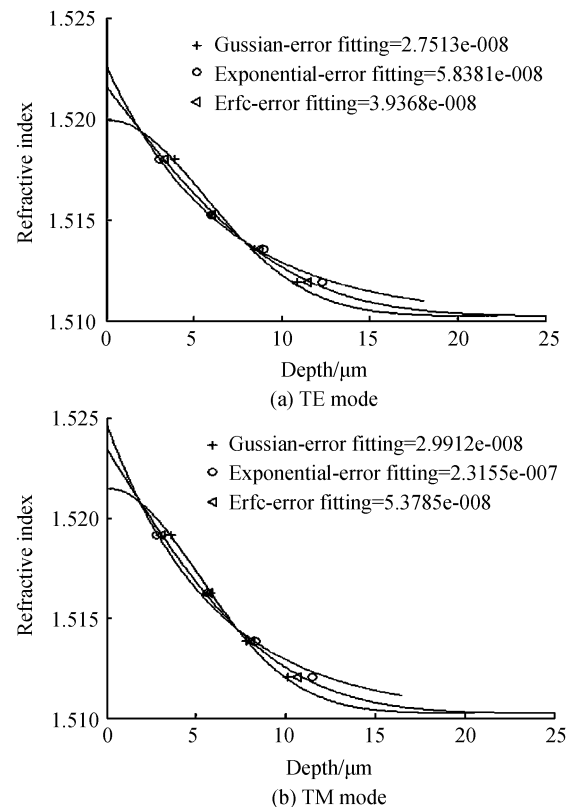


图 1 交换时间 18 h 时,波导样品的 TE、TM 模折射  
率分布曲线

Fig. 1 TE and TM mode refractive index profile of  
waveguides at 18 hours ion exchanged

## 2 单模平面波导的制作及各系数确定

波导深度(即有效扩散深度)可表示为

$$d = \sqrt{Dt} \quad (2)$$

式中,  $D$  为扩散系数,  $t$  为扩散时间(离子交换时  
间).前面的结果知道,18 h  $\text{K-Na}$  离子交换玻璃波  
导的有效扩散深度大约为  $8.0 \mu\text{m}$ ,所以由式(2)得  
到在 380 °C 的温度下离子交换过程的扩散系数为  
 $D = 0.00099 \mu\text{m}^2/\text{s}$ .

根据 18 h  $\text{K-Na}$  离子交换波导所获得的折射率  
分布等相关数据,可得到色散曲线,如图 2,由图 2  
可以看出制作单模波导的有效扩散深度范围为  
 $1 \mu\text{m}$  至  $2.4 \mu\text{m}$ .根据式(2)可得到在温度为 380 °C  
条件下制备单模波导的离子交换时间(扩散时间)范  
围应为 0.28 h 至 1.62 h 之间.

选取 1 h 作为制备单模波导的离子交换时间,  
在 632.8 nm 波长下用棱镜耦合技术测量该单模波  
导样品的 TE 模有效折射率为 1.51662, TM 模有  
效折射率为 1.51730.

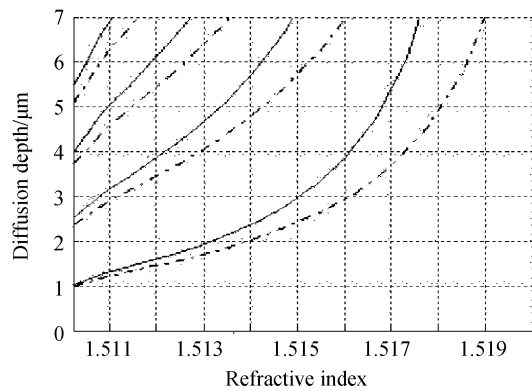


图2 离子交换时间 18 h 波导的 TE 模(实线)和 TM 模(虚线)色散曲线

Fig. 2 Disperse curves of TE mode (full line) and TM mode (dotted line) of waveguides at 18 hours ion exchanged

众所周知,用 IWKB 方法获得波导折射率分布的局限性是波导模式不能少于 3 个,故 IWKB 法无法用于单模平面波导折射率分布的重建,因此必须寻求其他方法获取其折射率分布.在 K-Na 离子交换玻璃波导的制备过程中,发现在一定的交换温度条件下,交换时间的长短决定模式的多少,具有不同模式数波导的折射率分布函数没有太大的变化,因此单模波导的折射率分布函数应该与多模波导的一致,即本文所制备的单模波导的折射率分布也应该是高斯分布,可以用式(1).由于离子交换温度与多模的情况一样,所以扩散系数也应该相同( $D = 0.00099 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ),所以由式(2)得到离子交换时间为 1 h 时的单模波导的 TE 和 TM 模的扩散深度分别是  $1.8856 \mu\text{m}$  和  $1.7442 \mu\text{m}$ ,通过求解 WKB 色散方程得到单模波导 TE 和 TM 模的表面折射率分别是 1.5194 和 1.5204(即 TE 和 TM 模式的折射率变化分别为  $\Delta n_{\text{TE}} = 0.0092$  和  $\Delta n_{\text{TM}} = 0.0102$ ),单模波导的参量如表 2.

表 2 380℃ 离子交换 1 h 单模波导的参量(折射率分布为高斯分布)

Table 2 Parameters of single mode waveguide at 380 °C, 1 hour ion exchanged (The refractive index profile is Gaussian distribution)

Modes	Effective index	Depth/ $\mu\text{m}$	Refractive index
TE	1.51662	1.8856	1.5194
TM	1.51730	1.7442	1.5204

### 3 单模波导传输损耗特性

实验采用普通的佳能 IXUS130 数码相机,像素 1 400 万,拍摄得到的为真彩色图像,将其输入电脑通过 Matlab 的图象处理工具箱转换为相同分辨率的灰度图象,照片的灰度共有 256 个等级.实验中所用光源波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器.理想的平面波导是不存在外部散射光的,而真实波导由于

界面不平整以及波导内部杂质散射,使导模转变为辐射模.可以认为:某一位置散射出来的光强主要受到该点的传输光强、界面不平整程度、杂质多少的影响.由于整块波导是在特定条件下一次性制备,后两因素的影响可以认为在整块波导中平均分布,即使由于杂质大小有涨落而出现某点散射光特别强,也可以在后期的图像处理中采用数字中值滤波技术加以消除.因此,散射光强将只和该处的实际传输光强线形相关.据此,可以采用数码相机对传输线上各点的散射光强进行记录,转换成内部传输光强.有损耗的导模功率随传播距离的衰减可表示为

$$P_z = P_0 \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

$$L = 4.3\alpha \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $\alpha$  和  $L$  均为损耗系数,其单位分别是  $\text{cm}^{-1}$  和  $\text{dB}/\text{cm}$ .在实际测量中,用最小二乘法对数码相机拍摄的光波导传输线用式(3)进行拟合得到  $\alpha$ ,然后通过式(4)计算得到传输损耗系数  $L$  ( $\text{dB}/\text{cm}$ ).

用数码相机拍摄单模波导 TE 模和 TM 模的传输线,并分别进行了损耗测试,用 Matlab 对退传输线进行数字图象处理,得到传输线的测量数据和拟合曲线,如图 3.

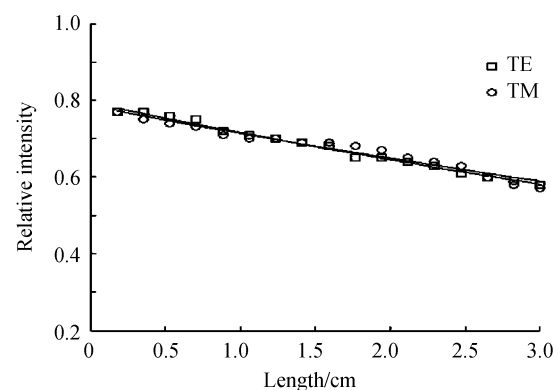


图3 离子交换时间 1 h 单模波导损耗拟合曲线

Fig. 3 Fitted curves of the loss of the single mode waveguide at 1 hour ion exchanged

由图3获得单模波导 TE 模损耗  $L = 0.4438 \text{ dB}/\text{cm}$ , TM 模损耗  $L = 0.4094 \text{ dB}/\text{cm}$ .

### 4 结论

本文利用 K-Na 离子交换技术制备了 Soda-lime 玻璃平面多模波导,通过棱镜耦合技术测量了波导的有效折射率,用 IWKB 方法拟合得到 K-Na 离子交换波导的折射率分布符合高斯分布,由色散曲线得到单模波导的制备条件(即扩散深度范围),从而得出单模波导的离子交换时间范围,制备出单模波导,并通过求解 WKB 色散方程得出单模波导的表面折射率.用普通数码相机,通过对离子交换平

面玻璃光波导传输线进行数字成像,根据传输线上的光强分布拟合出光强传输衰减曲线,计算出单模波导的传输损耗.用比较简单的方法得到单模波导的制作及其两个关键参量(表面折射率与损耗),为单模 K-Na 离子交换光波导器件的设计奠定了基础.

#### 参考文献

- [1] TERVONEN A, WEST B R, HONKANEN S. Ion-exchanged glass waveguide technology: a review[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(7): 071107-1.
- [2] LI Xi-hua, JIN Ning, GONG Ru-zhen, *et al.* Optical waveguide based on glass by technology of  $K^+$ - $Na^+$  and  $Ag^+$ - $Na^+$  two-step ion-exchange[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1520-1523.  
李锡华, 金宁, 宫汝振, 等.  $K^+$ - $Na^+$  和  $Ag^+$ - $Na^+$  两步离子交换技术制作玻璃基光波导研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1520-1523.
- [3] QI Zhi-mei, XIA Shan-hong, MASUDA N. Spectropolarimetric interferometer based on single-mode glass waveguides[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(3): 2245-2251.
- [4] MONIR M, REFAEI H E, KHALIL D. Single-mode refractive index reconstruction using an NM-line technique[J]. *Fiber And Integrated Optics*, 2006, **25**(2): 69-74.
- [5] WEI Jue, XU Xiao-feng, GENG He-ping, *et al.* Measurement of refractive index profiles for planar waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 534-536.  
韦珏, 徐晓峰, 耿和平, 等. 平面光波导折射率分布的测定[J]. 光子学报, 2005, **34**(4): 534-536.
- [6] PODVIAZNYI A A, SVISTUNOV D V. Improved interferometric method for determination of refractive index profile parameters in single-mode waveguides [J]. *Optics Communication*, 2002, **201**(4): 325-334.
- [7] CHIANG K S, WONG C L. Refractive-index profiling of graded-index planar waveguides from effective indexes measured for both mode types and different wavelengths[J]. *Lightwave Technol*, 1996, **14**(5): 827-832.
- [8] CHIANG K S, WONG C L. Refractive-index profiling of graded-index planar waveguides from effective indexes measured with different external refractive indexes [J]. *Lightwave Technol*, 2000, **18**(10): 1412-1417.
- [9] GAO Yan-jun, DONG Yi, QIU Feng, *et al.* Refractive index profiles of Ag-Na Ion-exchange glass waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1507-1510.  
高艳君, 董毅, 邱枫, 等. Ag-Na 离子交换玻璃波导的折射率分布研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1507-1510.
- [10] JIA Ling-hua, QIU Feng, QIAN Ying, *et al.* Digital camera photographing in measuring propagation loss properties of ion-exchange planar optical waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1058-1061.  
贾凌华, 邱枫, 钱颖, 等. 数码照相法测量离子交换平面光波导损耗特性[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1058-1061.

## Fabrication and Characterization of K-Na Ion Exchange Single Mode Planar Waveguides

LU Qing, XIA Hong-yun, ZHENG Jie

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Multimode glass planar waveguides were fabricated by K-Na ion exchange technique. The effective indices were measured by prism coupling technique. The refractive index profiles of the planar waveguides were reconstructed by Inverse Wentzel-Kramers-Brillouin method and the best fitted refractive index profile is Gaussian distribution. The fabrication condition of single mode waveguide was got from the dispersion curves and a single mode waveguide were fabricated. The surface refractive index obtained by WKB dispersion equation. The image of propagation in the waveguide was taken by digital camera, from which the light intensity attenuation curves were fitted and the propagation losses were calculated and the propagation loss of the single-mode waveguide is about 0.4 dB/cm.

**Key words:** Ion exchange; Single mode glass waveguides; Inverse WKB method; Refractive index profiles; Propagation loss