

文章编号: 0258-7025(2004)01-0037-04

高斯折射率分布 $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换 玻璃波导的制备

王鹏飞¹, 郑 杰^{1,2}, G. C. Righini³

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理开放实验室, 吉林 长春 130021
² 长春骏河精机有限公司, 吉林 长春 130031; ³ IFAC-CNR, Via Panciatichi 64, Florence, Italy

摘要 利用 $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换技术制备了玻璃平面光波导, 在 632.8 nm 波长下, 用棱镜耦合技术测量出所制备波导的有效折射率, 利用反 WKB 方法确定了平面光波导的折射率分布, 并对折射率分布进行了函数拟合, 近似符合高斯分布。求出了所制备玻璃平面光波导在 580°C 的扩散系数为 $D_e \approx 2.223 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

关键词 导波光学; 玻璃平面波导; $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换

中图分类号 TN 25 文献标识码 A

Fabricate in $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ Ion-exchange Glass Waveguide with Index Profile of Gauss

WANG Peng-fei¹, ZHENG Jie^{1,2}, G. C. Righini³

¹Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130021, China
²Changchun Suruga Seiki Co. Ltd., Changchun, Jilin 130031, China
³IFAC-CNR, Via Panciatichi 64, Florence, Italy

Abstract Planar optical waveguides were fabricated by $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange on soda-lime glass substrate. The effective refractive index was measured by prism-coupling technique at the wavelength of 632.8 nm. Refractive index profile was determined by Inverse-WKB method. Results are compared with mathematical solutions, the best fit to the index experiment data is Gauss function. Therefore, the diffused coefficient of $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange at 580°C is $D_e \approx 2.223 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$.

Key words guided-wave optics; glass planar waveguide; $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange

1 引 言

光波导技术已经越来越广泛地应用于光通信领域中。离子交换技术是最早用于制备光波导的技术之一, 也最有希望制备出传输损耗低和所需折射率分布的波导。离子交换技术是制备玻璃光波导的重要手段之一^[1]。

在离子交换技术领域中, 人们在 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$, $\text{K}^+ - \text{Na}^+$, $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$, $\text{Cs}^+ - \text{Na}^+$ 等离子交换技术方面

进行了大量的研究, 并取得了许多重要进展^[2]。近年来人们开始研究 $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换技术制备光波导, 发现此种光波导具有较好的非线性光学和蓝绿发光特性^[3]。因此, $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换波导将在光开关、光信息处理等领域具有良好的应用前景。H. Marquez 等^[1]用硅酸盐玻璃镀铜膜进行离子交换, 成功地制备了铜钠离子交换光波导; F. Gonella^[4]在 Soda-lime 玻璃上进行离子交换, 并利用原子顺磁性共振及 X 射线吸收等方法测量了所

收稿日期: 2002-08-12; 收到修改稿日期: 2002-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 69977020)资助项目。

作者简介: 王鹏飞(1977. 7—), 男, 吉林通化人, 硕士研究生。主要从事集成光学离子交换光波导制备研究。E-mail:

制备的光波导,证明基质材料折射率的改变来自一价 Cu^+ 的氧化态^[5]及电极化强度。但是,目前还没有对波导有效折射率分布特征进行研究的报道。因此,有必要对 Cu^+-Na^+ 离子交换技术制备波导的有效折射率分布特征作进一步实验研究。

本文利用 Cu^+-Na^+ 离子交换技术制备了 Soda-lime 玻璃波导,用棱镜耦合技术测量了有效折射率,对波导折射率分布进行了计算机拟合,发现波导的折射率分布函数均近似符合高斯分布。在此基础上,计算出在 580°C 下, Cu^+-Na^+ 离子交换过程的扩散系数并测试了实验样品的吸收光谱等光学特性。

2 实验

实验用的玻璃为英国生产的“Gold Star”牌(soda-lime glass),在 632.8 nm 波长下,其折射率为 $n_b = 1.51022$ 。主要成分为(以下均为质量百分比): $73.55\% \text{ SiO}_2$, $13.86\% \text{ Na}_2\text{O}$, $6.07\% \text{ CaO}$, $0.28\% \text{ K}_2\text{O}$, $3.92\% \text{ MgO}$, $1.73\% \text{ Al}_2\text{O}_3$, $0.43\% \text{ SO}_3$, $0.081\% \text{ F}_2\text{O}_3$, 其他 0.08% 。选用熔融的 CuSO_4 和 Na_2SO_4 混合熔液(摩尔浓度比为 $40:60$)作为离子交换熔液。将清洗后的样品浸没在 CuSO_4 和 Na_2SO_4 熔融的熔液中,在 580°C 的温度下进行离子交换,交换时间从 $2.5\sim 20\text{ min}$ 不等。由于样品的比重要比熔液的小,导致样品不能完全浸入熔液中,样品的两面离子交换的程度也不相同(向下的面会得到充分的离子交换),因此在取出样品的时候,要确定以样品完全浸没的一面为测试面。离子交换后的样品呈浅绿色。将离子交换过的样品固定在一个带有角度仪的旋转平台上,利用棱镜耦合技术^[6]测量样品的有效折射率。实验装置如图 1 所示。通过旋转耦合平台,改变入射光线的角度, M 线可在耦合平台后的接收屏上观察到,不同次序的 M 线依次出现在屏上的不同位置。波导的有效折射率 N_m 与同步角 θ_m 的关系^[6] 为

$$N_m = n_p \sin[\alpha + \sin^{-1}(\sin\theta_m/n_p)] \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

其中 α 和 n_p 分别为棱镜底角和棱镜折射率,根据(1)

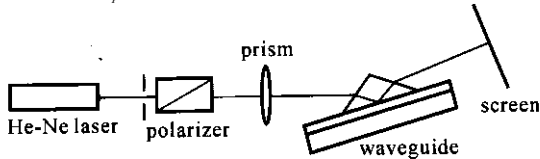


图 1 实验装置

式计算出波导的有效折射率(见表 1)。

表 1 Cu^+-Na^+ 波导在 632.8 nm 波长处的有效模折射率

Table 1 Effective mode indices of Cu^+-Na^+ waveguides at 632.8 nm

Sample	Diffusion time /min	No. of Modes	Mode Order	Effective TE	Index TM
1 [#]	2.5	3	0	1.5218	1.5219
			1	1.5164	1.5164
			2	1.5125	1.5125
2 [#]	5	7	0	1.5286	1.5287
			1	1.5234	1.5234
			2	1.5203	1.5177
			3	1.5176	1.5177
			4	1.5152	1.5152
			5	1.5132	1.5132
3 [#]	10	4	0	1.5177	1.5179
			1	1.5149	1.5150
			2	1.5130	1.5129
			3	1.5118	1.5119

* Exchange oven temperature: $T = 580^\circ\text{C}$.

由表 1 可以看出,样品中的 TE 和 TM 模的有效折射率值相差不大,这是由于 Cu^+ 和 Na^+ 离子半径相近(Cu^+ 为 0.096 nm , Na^+ 为 0.095 nm)^[1],离子交换后样品表面的应力较小,故双折射可以忽略不计^[4,7]。

对实验样品进行了吸收光谱的测试,见图 2(a), (b)。

3 结果与分析

根据上述实验结果,可以在波导参数(有效折射率、模深度)和处理数据(扩散时间、交换温度)之间找出准确的关系。首先必须证明试验中有效模折射率和模深度之间符合何种分布关系,这种关系是设计和制造优良的玻璃波导光学交换器件的技术基础^[1]。下面给出三种典型的分布函数表达式:

高斯分布

$$n(x) = n_b + \Delta n_s \exp(-x^2/d^2) \quad (2)$$

二次项分布

$$n(x) = n_s - \Delta n_s [(x/d) + b(x/d)^2] \quad (3)$$

费米分布

$$n(x) = n_b + \Delta n_s \left[1 - \exp(-d/a) + \exp\left(\frac{x-d}{a}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

上述公式中, $n_b = 1.51022(632.8\text{ nm})$, $\Delta n_s = n_s -$

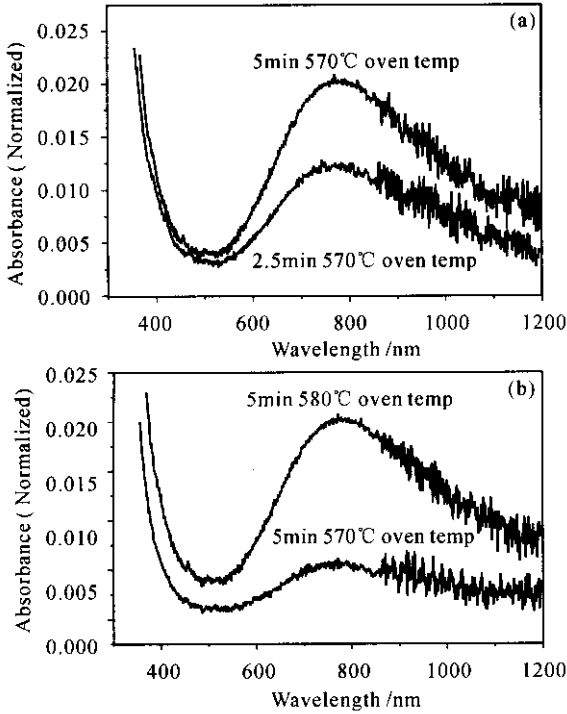


图2 Soda-lime 玻璃中 Cu⁺-Na⁺ 离子交换波导的吸收光谱

Fig.2 Absorption spectrum of Cu⁺-Na⁺ ion-exch. in soda-lime glass

n_b, d 为波导“厚度”, b 为二次项函数中的拟合参数, a 为费米函数中的影响因子。根据光线理论, 波导模折射率 N_m 满足以下方程

$$k_0 \int_0^{x_m} [n^2(x) - N_m^2]^{1/2} dx = m\pi + \frac{\pi}{4} + \tan^{-1} \left(\frac{N_m^2 - n_0^2}{n_s^2 - N_m^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中 $m = 1, 2, 3, \dots$ 为模阶数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数, $n_0 = 1$ 为空气的折射率, n_s 为波导的表面折射率, λ 为激光波长, x_m 为渐变折射率波导中弧形光线的拐点坐标, 且

$$N_m = n(x_m) \quad (6)$$

将(5)式左端变量代换, 分布积分, 可以得到

$$k_0 \int_0^{x_m} [n^2(x) - N_m^2]^{1/2} dx = k_0 \cdot d \left\{ \sqrt{n_s^2 - N_m^2} + n_b \arccos \frac{n_s}{N_m} - \sqrt{N_m^2 - n_b^2} \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{n_s n_b - N_m^2}{(n_s - n_b) N_m} \right] \right\} \quad (7)$$

同公式(1)联立, 即可求出第 m 阶和 $m+1$ 阶的有效折射率值 N_m 和 N_{m+1} , 消去未知数 d , 可求出表面折射率 n_s , 模深度可随之求出。因此利用反 WKB 方法^[8], 在已知波导模折射率的基础上, 可以计算出

与之对应的模深度, 如表 2 所示。

表 2 Cu⁺-Na⁺ 波导在 632.8 nm 处的有效模折射率及模深度

Table 2 Effective mode indices & mode thickness of Cu⁺-Na⁺ waveguides at 632.8 nm

Effective index		Mode depth / μm	
TE	TM	TE	TM
1.5218	1.5219	—	—
1.5164	1.5164	—	—
1.5125	1.5125	—	—
1.5287	1.5287	2.996	2.957
1.5235	1.5234	5.282	5.208
1.5204	1.5177	6.848	6.966
1.5177	1.5177	8.526	8.508
1.5153	1.5152	10.069	9.911
1.5133	1.5132	11.958	11.955
1.5118	1.5118	14.856	14.822
1.5177	1.5179	3.862	—
1.5149	1.5150	5.814	—
1.5130	1.5129	8.829	—
1.5118	1.5119	12.438	—

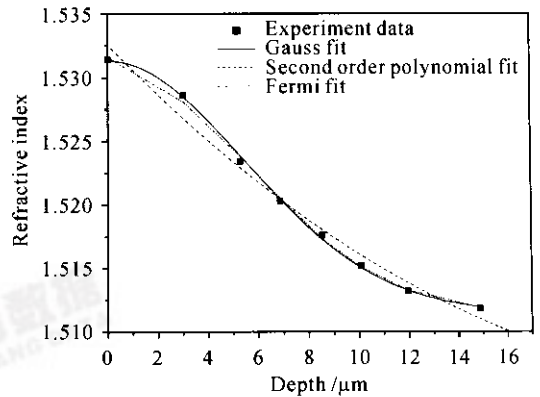


图3 归一化波导的折射率分布

Fig.3 Normalized waveguide refractive index profile

通过计算机软件对表 1 中的 2# 样品的试验数据进行了数值拟合, 见图 3。

比较拟合结果, 三种函数中高斯函数拟合的误差最小, 可认为 Cu⁺-Na⁺ 离子交换钠钙玻璃光波导的有效折射率分布曲线近似为高斯分布。在拟合结果中, 得到表面折射率 $n_s = 1.5315$; 扩散厚度 $d = 8.16725$, 拟合误差为 ± 0.13976 。根据扩散厚度和扩散系数的关系式

$$d = \sqrt{D_e t} \quad (8)$$

式中 D_e 为有效扩散常数。联合波导参数(扩散厚度

d) 和处理参数(交换时间 t), 可得扩散系数为 $D_e \approx 2.223 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

通过对图 2(a), (b) 吸收光谱图的分析, 发现在 800 nm 波段附近有较宽的吸收带, 这是由玻璃基质中掺杂的 Cu^+ 改变了玻璃中的晶体结构, 形成了晶体结构缺陷引起的。可以看到, 图 2(a) 中随着实验时间的增加, 吸收峰的峰值随之增高; 图 2(b) 中随着实验温度的增高, 吸收峰的峰值随之增高。这种现象证明在一定的时间和温度范围内, 玻璃中交换的铜离子的浓度是随着温度和时间增加而增加的。但是, 在对 BK7 玻璃做同样的实验时, 除了折射率分布也符合高斯分布外, 光谱特性却得到了与 Soda-lime 玻璃相反的结果, 即随着时间和温度的增加, 峰值减小。这种现象证明玻璃中交换的铜离子的浓度是随着温度和时间增加而减少的, 该现象的原因尚不完全明了。 Cu^{2+} 在熔融的状态下, 存在平衡方程: $2\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{Cu}^0$ 。 Cu^+ 离子半径为 0.096 nm, 近似等于 Na^+ 离子半径(0.095 nm), 故 Cu^+ 较 Cu^{2+} 更易在玻璃的晶格中取代 Na^+ 的位置, 同时 Cu^+ 比 Cu^{2+} 的电子极化率大, 因此在离子交换过程中对折射率改变起主要贡献的是一价 Cu^+ 离子^[9]。

4 结 论

在高温下用铜钠离子交换技术制备了 Soda-lime 玻璃光波导, 用棱镜耦合技术测量了所制备波导的有效折射率, 并用反 WKB 方法对波导折射率分布进行了计算机拟合, 发现折射率数值分布曲线

近似为高斯分布, 这说明利用 $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换技术制备光波导具有特殊的优越性。通过计算得到在 580 °C 下, 扩散系数 $D_e \approx 2.223 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ 。测试了实验样品的吸收光谱, 发现随着交换时间的增加和温度的升高, 波导中 Cu^+ 的浓度也增加了。得到了波导的基本特性与制备工艺参数的关系, 可以通过控制工艺参数来精确控制波导的交换深度, 制备出特定性能的玻璃光波导。

参 考 文 献

- 1 H. Marquez, D. Salazar, A. Villalobos *et al.*. Experimental study of $\text{Cu}^+ - \text{Na}^+$ exchanged glass waveguides [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(25):5817~5822
- 2 R. V. Ramaswamy, R. Srivastava. Ion-exchanged glass waveguides: a review [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6):984~1002
- 3 R. Debnath. On the excitation of the 3E luminescent state of Cu^+ ions in glass [J]. *J. Lumin.*, 1989, **43**(6):375~377
- 4 F. Gonella. Characterization of Cu-Na ion-exchanged glass waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(3):314~315
- 5 Jacho Lee, Tetsuji Yano, Shuichi Shibata *et al.*. EXAFS study on the local environment of Cu^+ ions in glasses of the $\text{Cu}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ system prepared by $\text{Cu}^+ / \text{Na}^+$ ion exchange [J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 2000, **277**(2/3):155~161
- 6 R. Ulrich, R. Torge. Measurement of thin film parameters with a prism coupler [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(12):2901~2908
- 7 F. Gonella, F. Caccavale, A. Quaranta *et al.*. Copper-doped ion-exchanged waveguide characterization [J]. *J. Mod. Opt.*, 1998, **45**(4):837~845
- 8 J. M. White, P. F. Heidrich. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(1):151~155
- 9 F. Gonella, F. Caccavale, L. D. Bogomolova *et al.*. Experimental study of copper-alkali ion exchange in glass [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(3):1200~1206