

文章编号: 0258-7025(2010)03-0689-07

棱镜耦合法确定条形波导的渐变折射率分布

杨天新 邹 豪 王 雷 李 睿 王俊龙 桑 梅

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出了由棱镜波导耦合装置测量得到的条形波导有效模折射率确定其二维(2D)折射率分布的方法, 其中条形波导样品是在磷酸盐玻璃基底上用离子交换方法制备的, 采用不同交换时间和不同掩膜开口宽度制备出不同的折射率渐变分布条形波导。计算过程是先给定条形波导二维折射率分布的拟合函数及参数, 按照 Wentzel-Kramer-Brillouin(WKB)方法和有效折射率方法, 由二维折射率分布的拟合函数计算出条形波导的有效模折射率, 并将计算出的有效模折射率与测量值进行比较, 通过调整修改折射率分布拟合函数中的参数, 使有效模折射率的计算值与测量值接近, 从而确定出被测条形波导的折射率分布。在掩膜开口宽度、离子交换温度和时间等制备工艺参数与形成的条形波导的折射率分布参数之间建立联系, 为可重复性制备高质量的波导器件提供可靠的制备工艺参数。

关键词 导波光学; 离子交换; 条形波导; 渐变波导折射率分布

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0689

Determining the Graded-Index Profiles of Channel Waveguides by Prism Coupling Method

Yang Tianxin Zou Hao Wang Lei Li Rui Wang Junlong Sang Mei

(Key Laboratory of Optoelectronic Information, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering Technology Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A method for determining the two-dimensional (2D) index profiles of channel waveguides by the datum of the effective indexes measured by prism coupling method is proposed. The channel waveguides are home-fabricated by ion-exchanged method on the substrate of phosphate glass with various diffusion times and various mask opening widths. The method for calculating the 2D index profiles is set up based on the theory of graded-index waveguides, such as Wentzel-Kramer-Brillouin (WKB) method and effective index method. First, an index profile function is supposed. Then its effective indexes calculated by a homemade program based on WKB method and effective index method are compared with the measured results of the effective index. Finally the best-fit index profile is reconstructed by modifying the supposed index profile until the calculated effective indexes are becoming very close to the measurement of the effective indexes. The relationships between the fabricating parameters, such as diffusion time and mask opening width, with index profile of waveguides can be set up. This work could be useful for optimizing the fabrication process of channel waveguides in order to obtain high quality waveguide lasers and photonic waveguide devices repeatedly and effectively.

Key words guide-wave optics; ion-exchanging; channel waveguide; index profile of graded-index waveguide

1 引 言

用铷钠离子($K^+ - Na^+$)交换的方法在铈共掺的磷酸盐玻璃基底 (IOG-1) 上制备条形波导的技术已经成为现代光子集成技术的典型手段之一, 用这种方法制备的波导激光器的单模输出功率可达百毫

瓦, 输出波长位于人眼安全波段 ($1.54 \mu\text{m}$), 可以作为光源应用于自由空间光通信和生物医学光学检测技术中。在波导器件的应用过程中, 考虑到单模波导的光束质量最好^[1], 所以希望制备的条形波导在中心波长 $1.54 \mu\text{m}$ 附近是单模的。但是导模光的传

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(60178032)资助项目。

作者简介: 杨天新(1964—), 女, 博士, 教授, 主要从事光电子技术领域的研究。E-mail: tyang@tju.edu.cn

播模式和波导中导模的个数取决于波导的折射率分布。用离子交换法制备条形波导的机理是由离子扩散或内部应力等效效应导致折射率发生变化,其折射率分布是渐变、各向异性的,可以用函数近似来描述。因此需要了解描述波导折射率分布的深度参数与离子交换时间和时间的关系,对于条形波导,还希望得到掩模板的开口宽度与折射率侧向分布宽度之间的关系。目前很少见到有文献报道关于在磷酸盐玻璃基底上制备条形波导的详细研究结果。

通过棱镜耦合法测量波导的有效模折射率来重构波导折射率分布的方法有很多报道,但一般应用于一维平面波导结构,主要是对平面玻璃波导的研究比较充分,通过不同的离子交换工艺在不同的玻璃基底上已经制备了很多种不同的平面波导,并得到了波导的一维(扩散深度方向)折射率分布函数^[2~5]。但这些方法不能简单地推广到二维条形波导上,因为由离子交换和扩散形成条形波导时,由于金属掩膜层的存在,使得离子扩散速率在深入基底的纵向和沿基底表面的侧向是不同的,这种效应对不同玻璃基底的影响也不同,对于在 BK7 硅基玻璃基底上制备的二维条形波导折射率分布的详细研究已经证明这种各向异性的扩散效应是显著的^[6]。虽然已经有研究小组利用在磷酸盐玻璃基底上制备的条形波导组成了波导激光器^[7],但是对波导的制备工艺参数与波导的折射率分布的对应关系的研究是欠缺的。本文对制备过程参数(例如离子交换时间、掩膜开口宽度)对条形波导折射率分布的影响做了系统的实验测量和理论研究。

2 磷酸盐玻璃平面波导折射率分布

为了确定 $K^+ - Na^+$ 交换在 Er:Yb 共掺的 IOG-1 磷酸盐玻璃(美国 SCHOTT Glass Technologies Inc. 公司)中形成的折射率分布,从平面波导出发,利用如图 1 所示的棱镜耦合测量装置,测量并计算有效模折射率。

将制备好的平面波导的两个端面抛光后,用固定在旋转台上的压紧装置将波导与耦合棱镜紧密接触,线偏振的 He-Ne 激光从棱镜入射,转动平台,当光束的入射角满足模式匹配条件时,样品中形成导模,将样品的端面成像于 CCD 摄像机或观察屏上,就可以看到导模的 M 线。测量每一条 M 线的光束入射角 φ_m ,就可以计算出对应导模的有效模折射率 $N_{\text{eff}}(m)$

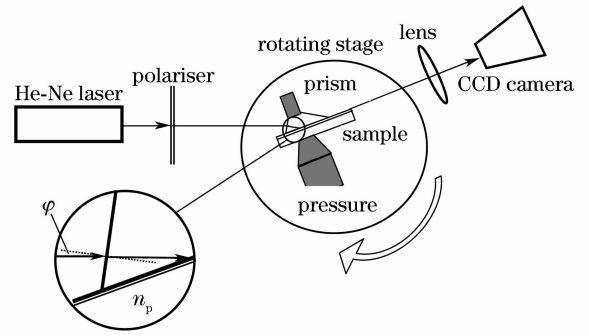


图 1 棱镜耦合测量波导有效模折射率装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of setup for measuring the effective mode-index

$$N_{\text{eff}}(m) = n_p \sin \left[\alpha + \arcsin \left(\frac{1}{n_p} \sin \varphi_m \right) \right], \quad (1)$$

式中 n_p 为棱镜的折射率; α 为棱镜的一个底角; φ_m 为 m 阶导模形成时,从转台上测量得到的光线在棱镜处的入射角。

对于玻璃基底材料的离子交换产生的折射率 $n(y)$ 随扩散深度 y 的变化可以用下列 4 种函数来描述,分别为

指数函数

$$n(y) = n_s + \Delta n \exp \left(-\frac{y}{d} \right), \quad (2)$$

高斯函数

$$n(y) = n_s + \Delta n \exp \left(-\frac{y^2}{d^2} \right), \quad (3)$$

费米函数

$$n(y) = n_s + \Delta n \frac{1}{1 + \exp[(y - \omega)/d]}, \quad (4)$$

余误差函数

$$n(y) = n_s + \Delta n \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{d} \right), \quad (5)$$

式中 n_s 为基底材料的折射率, Δn 为波导表面最大折射率增量, d 为折射率分布的等效深度。由 Wentzel-Kramer-Brillouin(WKB)法可以得到折射率渐变的波导模本征方程为^[8]

$$2k \int_0^{x_t(m)} \sqrt{n(y)^2 - N_{\text{eff}}(m)^2} dy = 2m\pi + 2\phi_1 + 2\phi_2, \quad (6)$$

式中 $x_t(m)$ 为 m 阶导模的拐点,即 $n[x_t(m)] = N_{\text{eff}}(m)$; $2\phi_1$ 和 $2\phi_2$ 分别为 m 阶导模在波导表面和拐点处的相移,表示为

$$\phi_1 [N_{\text{eff}}(m)] = \arctan \left\{ r_a \left[\frac{N_{\text{eff}}^2(m) - n_{\text{air}}^2}{n_{\text{peak}}^2 - N_{\text{eff}}^2(m)} \right]^{1/2} \right\}, \quad (7)$$

$$\phi_2 = \pi/4,$$

式中 $n_{\text{peak}} = n_s + \Delta n$, $n_{\text{air}} = 1$ 。对于 TE 模, $r_a = 1$;

对于 TM 模, $r_a = n_{\text{peak}}^2$ 。利用测量到的 φ_m , 由(1)式可计算出 $N_{\text{eff}}(m)$ 。设置折射率分布函数的形式 $n(y)$ 及不同的 Δn 和 d 数值, 代入(6)式, 通过程序数值拟合出最佳的 Δn 和 d 的大小。同时也可以根据(2)~(5)式列出的 4 种折射率分布函数的拟合程度来确定波导的折射率分布函数最接近哪一种形式。

测量过程中采用的耦合棱镜由高折射率玻璃

SF6 ($n_p = 1.79884$) 制成, 其底角为 $\alpha = 55.068^\circ$, IOG-1 磷酸盐玻璃基底的折射率为 $n_s = 1.517$, 制备了离子交换时间分别为 1, 2, 3, 5 和 11 h 的 5 块平面波导样品, 并对其有效模折射率进行了测量。以离子交换时间为 5 h 的 TE 模的测量数据为例, 分别用(2)~(5)式折射率分布函数来拟合, 得到的结果如图 2 所示。

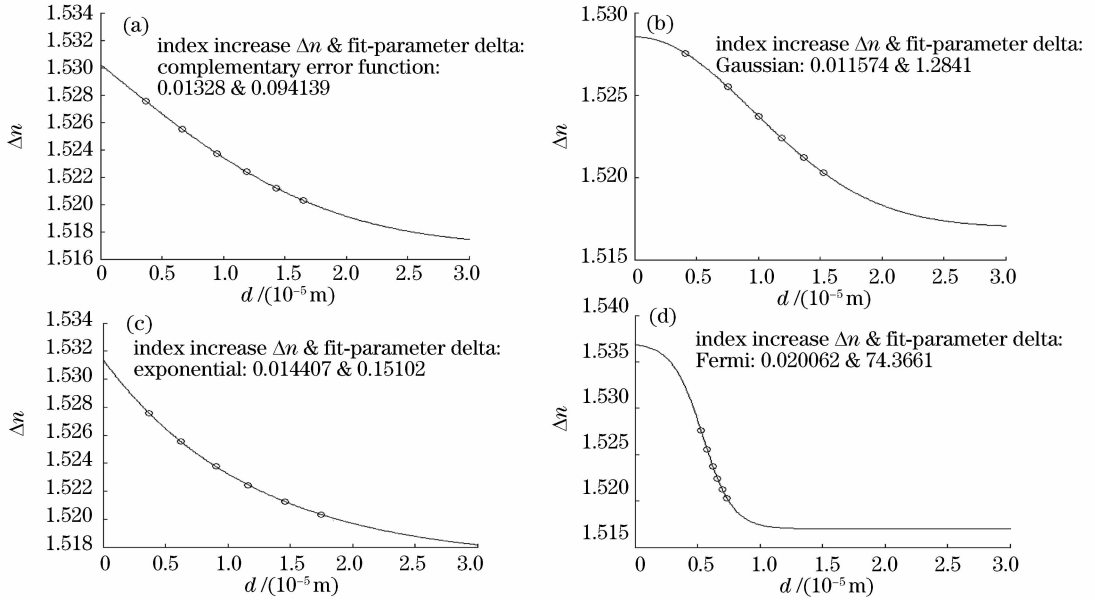


图 2 4 种折射率分布函数拟合结果。(a) 余误差函数; (b) 高斯函数; (c) 指数函数; (d) 费米函数
 Fig. 2 Results fitted by different functions. (a) complementary error function; (b) Gaussian function; (c) exponential function; (d) Fermi function

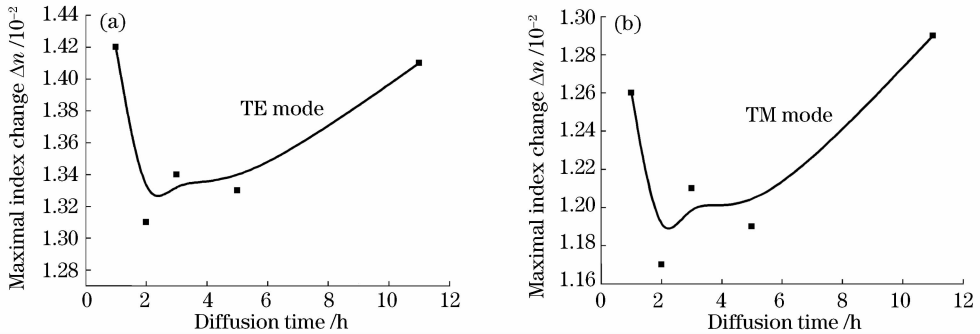


图 3 平板波导表面折射率变化与离子交换时间的关系
 Fig. 3 Curves of maximal refractive index change varying with diffusion time

由图 2 可以看出, 对于 $K^+ - Na^+$ 交换在 IOG-1 磷酸盐玻璃^[6]中形成的折射率分布, 用余误差函数比较理想, 高斯函数和指数函数的拟合程度相当, 费米函数的拟合效果最差。所以在以后拟合过程中, 从图 3 和图 4 可以看出:

1) 表面折射率变化随离子交换时间的变化有一个拐点, 出现在交换时间 2~4 h 之间, 这也说明钾离子在磷酸盐玻璃中的扩散速度和扩散能力是很

采用余误差函数作为(6)式模方程的拟合解。

图 3 显示了拟合计算得到的平板波导表面折射率变化 Δn 与离子交换时间的关系, 图 4 为平板波导折射率分布的等效深度 d_y 与离子交换时间的关系。大的。

2) 等效深度随着离子交换时间的增加几乎线性增长, 并没有出现明显的饱和趋势, 与硅酸盐玻璃相比较, 磷酸盐玻璃更适合于制作掩埋式波导。

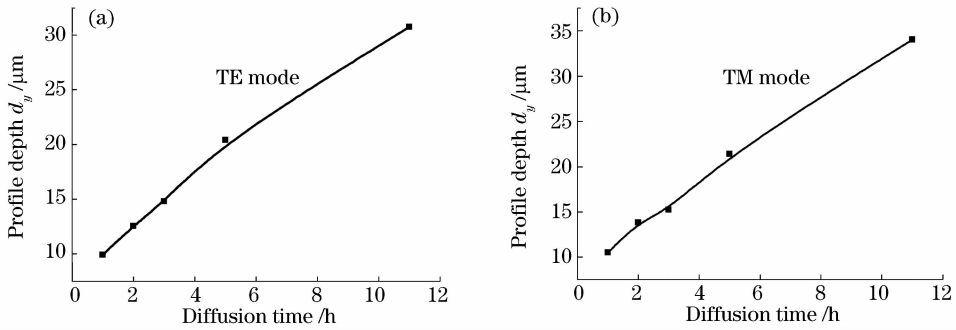


图4 平板波导折射率分布的等效深度与离子交换时间的关系

Fig. 4 Curves of effective depth of index profiles varying with diffusion time

3 磷酸盐玻璃条形波导折射率分布

在磷酸盐玻璃基片上的条形波导布局如图5所示, 31条掩膜开口宽度从 $1\ \mu\text{m}$ 渐变到 $7\ \mu\text{m}$ 的一组条形波导, 平行于基片的一个侧边(z 轴方向), 在每一条波导的宽度方向(x 轴方向)和深度方向(y 轴方向)折射率都是渐变的, 设定拟合函数在 x 方向是高斯分布的^[6], 在 y 方向仍采用余误差函数分布, 条形波导的折射率分布函数为

$$n(x, y) = n_s + \Delta n \exp\left(-\frac{x^2}{d_x^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{d_y}\right), \quad (8)$$

式中 d_x 和 d_y 分别为条形波导折射率分布的等效半宽度和等效深度。

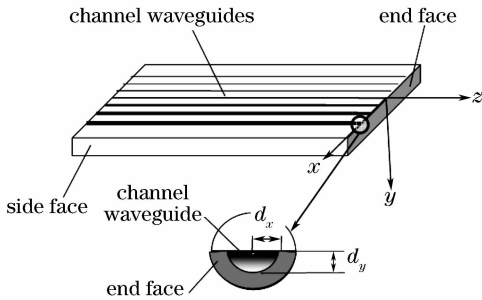


图5 条形波导样品示意图

Fig. 5 Schematic diagram of channel-waveguide sample

3.1 条形波导折射率分布的计算方法

根据棱镜耦合法测定的模有效折射率, 确定条形波导的折射率分布(8)式中的3个参数 Δn , d_x 和 d_y 的方法是: 先设定3个参数的取值, 由(8)式的折射率分布计算相应的条形波导有效模折射率, 将计算得到的有效模折射率与测量得到的有效模折射率进行对比, 如果不一致, 则修改 Δn , d_x 和 d_y 的设定值, 直到计算值与测量值最接近为止。

对于折射率二维分布的条形波导, 由折射率分布求有效模折射率的方法有两种, 一种叫作马卡梯里近似解析法(Marcatili's Method), 另一种叫作有

效折射率法(Effective Index Method)。马卡梯里近似解析法适用于远离截止模的计算, 有效折射率法比马卡梯里近似解析法更精确, 本文采用第二种方法。首先将条形波导分解为在 x , y 两个方向上的平面波导, 对于 y 方向上的平面波导是一个折射率渐变的强非对称平面波导, 而 x 方向上是一个折射率渐变的对称平面波导。

根据WKB法, 对于强非对称波导 m 阶的模式方程表示为

$$k \int_0^{y_i^{(m)}} \sqrt{n(y)^2 - N_{\text{eff}}^2(m)^2} dy = m\pi + \arctan\left\{r_a \left[\frac{N_{\text{eff}}^2(m) - n_{\text{air}}^2}{n_{\text{peak}}^2 - N_{\text{eff}}^2(m)}\right]^{1/2}\right\} + \frac{1}{4}\pi. \quad (9)$$

对于对称波导 m 阶的模式方程表示为

$$k \int_0^{x_i^{(m)}} \sqrt{n(x)^2 - N_{\text{eff}}^2(m)^2} dx = \frac{m}{2}\pi + \frac{1}{4}\pi. \quad (10)$$

由马卡梯里方法得到提示, 将 $n(x, y)$ 分解为在 x 和 y 方向上的两个平面波导进行计算。首先给定 Δn , d_x , d_y 的初始值, 然后将 $n(x, y)$ 在 x 方向上离散化, 得到对于每一个 x_i 都有一个非对称平面波导, 其折射率分布为

$$n(x_i, y) = n_s + \Delta n \exp\left(-x_i^2/d_x^2\right) \operatorname{erfc}(y/d_y). \quad (11)$$

对于指定某一个 x_i 来讲, $n(x_i, y)$ 只是关于 y 的函数, 将此 $n(x_i, y)$ 函数代入到强非对称的模式本征方程(9)中, 求出基模(即 $m=0$)所对应的有效折射率 $N_{\text{eff}0, x_i}$, 按照马卡梯里的处理方法, 可以将 $N_{\text{eff}0, x_i}$ 作为沿 y 方向上平面波导的折射率分布函数中的一个离散值 $n(x_i)$ 。对于所有的 $\{x_i\}$, 计算 $\{N_{\text{eff}0, x_i}\}$ 并作为 $n(x)$ 的离散值代入到对称的模式本征方程(10)中, 计算模有效折射率 $N_{\text{eff}}(m)$ 。最后, 将计算得到的 $N_{\text{eff}}(m)$ 与由棱镜耦合法测量得

到的模有效折射率进行比较,通过改变初始参数 $\Delta n, d_x, d_y$ 的值,使两者达到一致,输出 $\Delta n, d_x, d_y$ 的最终值,确定条形波导的折射率分布 $n(x, y)$ 。

3.2 条形波导的制备参数与其折射率分布关系

对于掩膜开口宽度一定的条形波导,其折射率分布的半宽度 d_x ,深度 d_y 和表面折射率增量 Δn 与扩散时间的关系分别如图 6(a)~(c)所示。其规律归纳为:1) 半宽度 d_x 和深度 d_y 都随扩散时间的增加而加大;2) 准 TM 模的折射率分布范围一般都大于准 TE 模,存在明显的双折射效应;3) 对准 TM

模和准 TE 模来说,虽然条形波导表面中心处的折射率最大增量 Δn 并没有明显的差异,但是随着交换时间的不同,存在一个拐点,这一结论与平面波导得到的结论是一致的(见图 3),都是由钾离子在磷酸盐玻璃中的扩散性质决定的。但在条形波导的制备过程中,由于金属掩膜的存在,长时间的离子交换时间会在样片表面产生严重的腐蚀(见图 7),影响波导质量,因此,在产生等量折射率变化的前提下,应尽量减少离子交换时间,以便制备出高质量的条形波导。

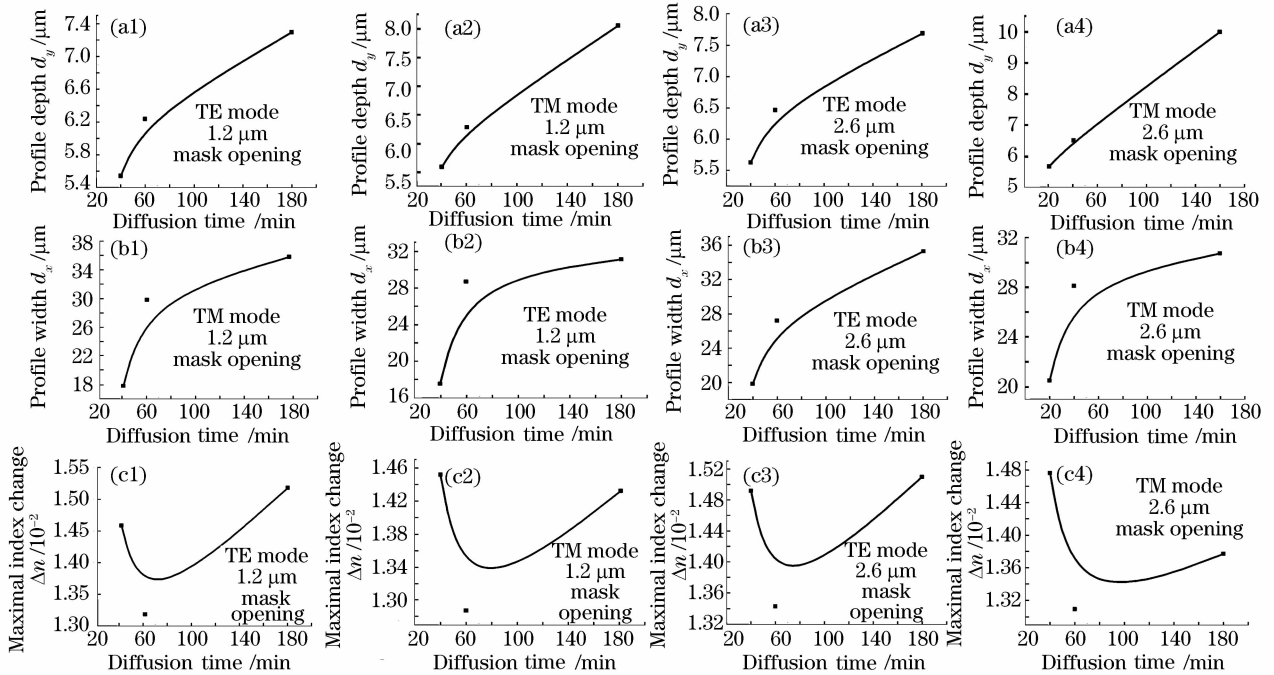


图 6 掩膜开口宽度一定时,半深度 d_y (a),半宽度 d_x (b)和表面折射率增量 Δn (c)随扩散时间的变化

Fig. 6 Effective depth d_y (a), effective half width d_x (b), and maximal index change Δn on the surface of channel waveguides (c) versus diffusion time for the same mask opening width

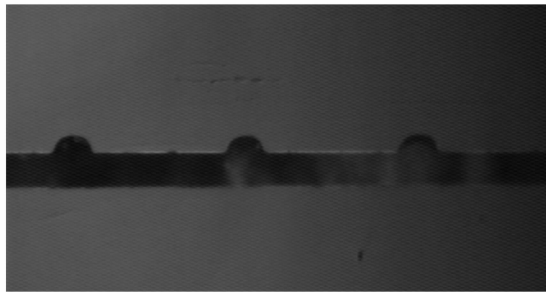


图 7 离子交换使掩膜开口处的玻璃表面产生严重的腐蚀

Fig. 7 Photographic image of end surface of etched channel-waveguide sample

不同开口宽度的波导表面折射率增量随扩散时间的变化规律比较复杂,如图 8(a)~(c)所示。这可能是由于影响折射率变化的因素比较多造成的,除了离子浓度因素外,还可能存在应力导致折射率

变化。

扩散深度 d_y 随掩膜开口宽度的变化并不是单调的,对于经历较长的离子交换时间的样品,掩膜开口越宽的波导深度反而变小,如图 9(c)所示。

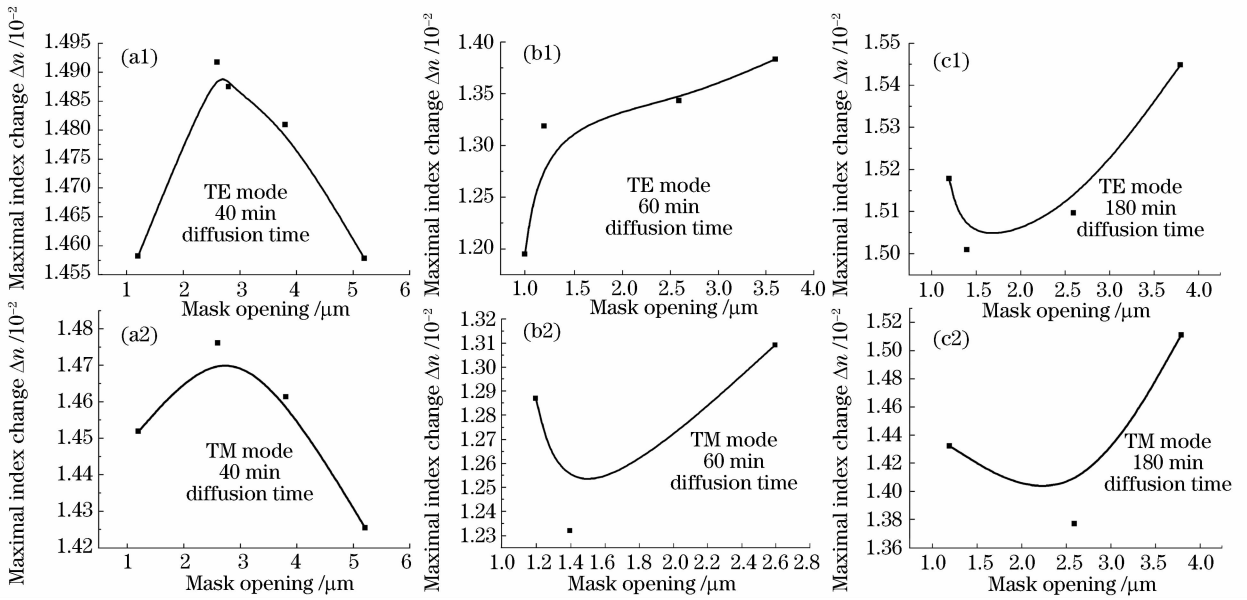


图8 交换时间较短(40 min)(a),交换时间加长(60 min)(b)和交换时间较长(180 min)(c)时,表面折射率增量 Δn 随掩膜开口宽度的变化

Fig. 8 Maximal index change Δn on the surface of channel waveguides versus mask opening width for short diffusion time of 40 min (a), moderate diffusion time of 60 min (b) and long diffusion time of 180 min (c)

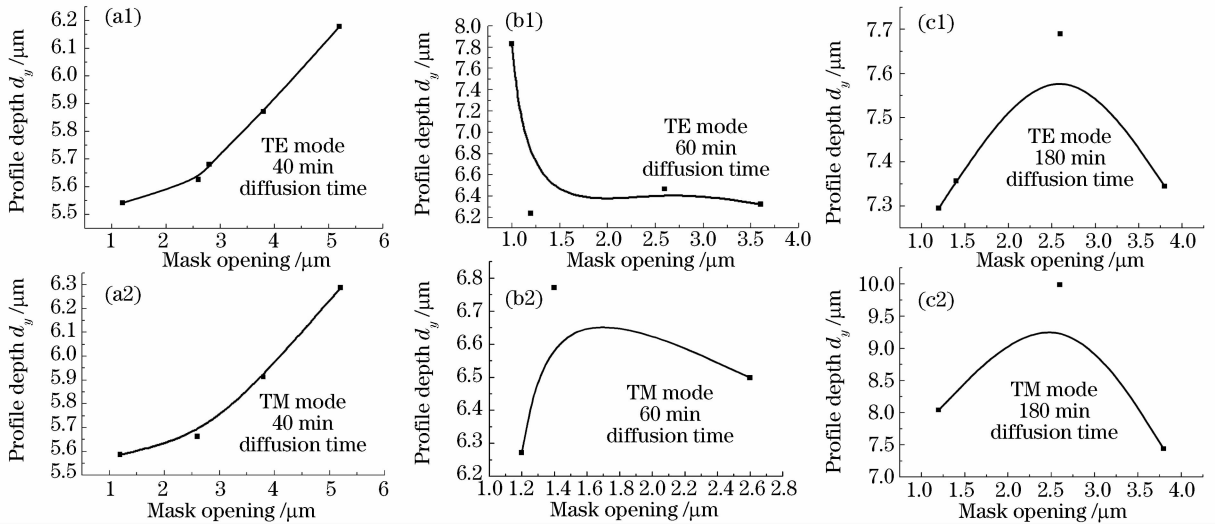


图9 交换时间较短(40 min)(a),交换时间加长(60 min)(b)和交换时间较长(180 min)(c)时,扩散深度 d_y 随掩膜开口宽度的变化

Fig. 9 Effective depth d_y of index profiles versus mask opening width for short diffusion time of 40 min (a), moderate diffusion time of 60 min (b) and long diffusion time of 180 min (c)

扩散宽度 d_x 随开口宽度的变化也不是单调的,对于经历较长的离子交换时间的样品,掩膜开口宽度越大的波导宽度 d_x 反而变小,如图 10(b), (c) 所示。

综上所述,在磷酸盐玻璃上制备条形波导的宽度与深度的比值 $R = 2d_x/d_y$ 一般在 6~10 之间,而在硅酸盐玻璃上条形波导的这个比值 R 一般在 2~4 之间^[6]。由此可见,这两种材料的性能差异较大。

4 结 论

对自行制备的大量不同制备参数的条形波导进行了详细、系统的测量和表征,使用自行开发的程序,拟合出条形波导的折射率分布,发现条形波导的掩膜开口宽度对折射率的分布影响较大,而且钾离子在磷酸盐玻璃的扩散能力很强,所以制备条形波导时掩膜的开口宽度不能太大,最好在 1~2 μm ;同时离子交换时间也不能太长,最好在 3 h 以内。在这

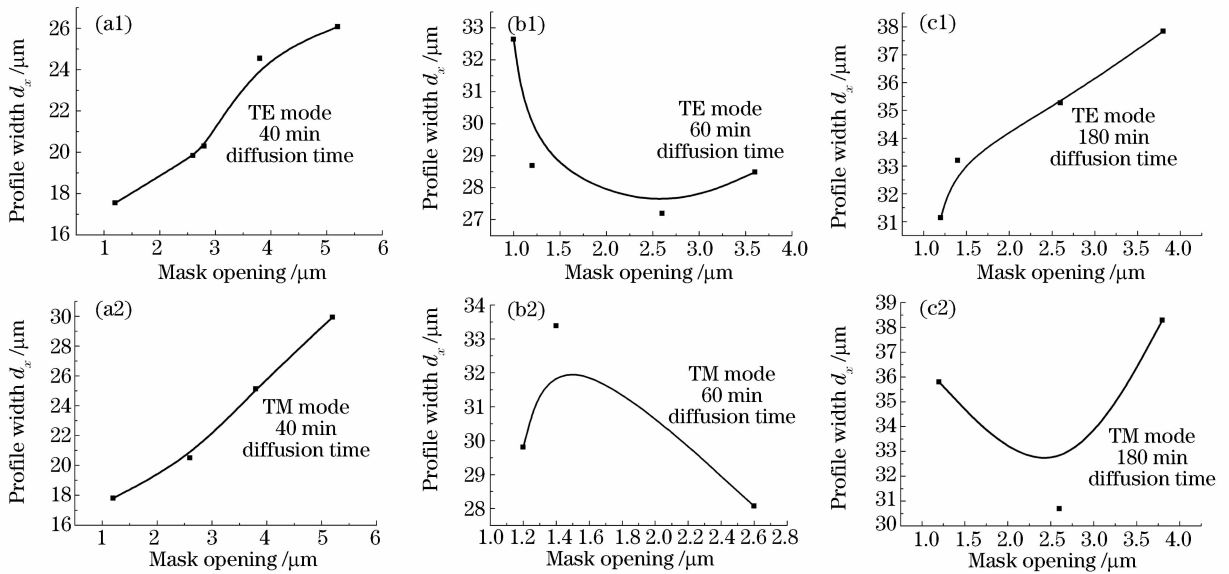


图 10 交换时间较短(40 min)(a),交换时间加长(60 min)(b)和交换时间较长(180 min)(c)时,扩散宽度 d_x 随掩膜开口宽度的变化

Fig. 10 Effective width d_x of index profiles versus mask opening width for short diffusion time of 40 min (a), moderate diffusion time of 60 min (b) and long diffusion time of 180 min (c)

个范围内,波导的折射率分布参数与波导的制备工艺参数之间遵循一定规律。

参 考 文 献

- Guo Fuyuan, Li Lianhuang, Wang Minghua. Gaussian approximation for mode field distribution of dielectric planar waveguide TE₀ mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):235~239
郭福源,李连煌,王明华. 介质平面光波导 TE₀ 模模场分布的高斯近似[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2):235~239
- Wang Pengfei, Zheng Jie, G. C. Righini. Fabricate in Cu⁺-Na⁺ ion-exchange glass waveguide with index profile of Gauss [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):37~40
王鹏飞,郑杰,G. C. Righini. 高斯折射率分布 Cu⁺-Na⁺ 离子交换玻璃波导的制备[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):37~40
- Zheng Jie, Ma Shaojie, Zhang Jiaye. Study on the properties of ion-exchange erbium doped phosphate glass waveguides [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):447~449
郑杰,马少杰,张家骅. 离子交换铒掺杂磷酸盐玻璃波导特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):447~449
- Ming Xianbing, Lu Fei, Liu Hanping *et al.*. Characterization of optical waveguide in ZnO crystal formed by MeV helium ion implantation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2):453~457
明宪兵,卢霏,刘汉平等. MeV He⁺ 离子注入氧化锌晶体光波导特性研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2):453~457
- Zhao Shilong, Xu Shiqing, Wang Baoling *et al.*. Er³⁺/Yb³⁺ codoped phosphate glass planar waveguides by Ag⁺-Li⁺ ion exchange [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):818~821
赵士龙,徐时清,王宝玲等. Ag⁺-Li⁺ 离子交换制作 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃平面光波导[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4):818~821
- M. N. Weiss, R. Srivastava. Determination of ion-exchanged channel waveguide profile parameters by mode-index measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(3):455~458
- D. L. Veasey, D. S. Funk, P. M. Peters *et al.*. Yb/Er-codoped and Yb-doped waveguide lasers in phosphate glass [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2000, **263-264**:369~381
- K. S. Chiang. Construction of refractive-index profiles of planar dielectric waveguides from the distribution of effective indexes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(2):385~391