

文章编号: 0253-2239(2003)06-0694-3

两步离子交换玻璃光功分器的折射率分布*

周自刚^{1,2} 刘德森²

(1 苏州大学物理系, 苏州 215006)
(2 西南师范大学物理系, 重庆 400715)

摘要: 介绍了在用两步离子交换方法制作光功分器中, 在高斯分布为初始条件下采用平均法求出非线性两步离子扩散方程的折射率分布, 与实验测出的折射率分布符合得很好。该法尤其对单模光功分器求其折射率更为简单和实用。

关键词: 导波光学; 两步离子交换; 玻璃光功分器; 平均法; 非线性扩散方程; 高斯分布

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

离子交换已成为生产玻璃光功分器和其他光子器件的重要技术^[1]。为了提高光功分器的光学特性和制作集成光器件, 采用了两步或多步离子交换, 如掩埋法、退火、加电场法等。尤其是采用两步离子交换法制作出的光功分器能优化与光纤耦合和降低表面扩散损耗^[2]。而且两步离子交换法是一个制作集成光子器件既简单又实用的方法^[3]。

以前采用近似数字求解法来求出离子交换后折射率分布, 但是求解结果不理想, 且计算时间长^[2], 其原因在于是在线性离子交换模型下进行的, 并没有考虑到离子交换过程是一个非线性过程, 其结果只能是近似值。

本课题主要是采用两步离子交换法使熔盐中钛离子(Ti⁺)与玻璃中的钠离子(Na⁺)进行非线性离子

交换, 用平均法^[4]来求出折射率分布情况(能应用到各种非线性情况)。只要第一步离子交换已有分布结果就可以作为第二步离子交换的已知条件, 能准确求出折射率分布。

2 理 论

平面光波导离子交换方程是^[1]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D}{1-\alpha C} \frac{\partial C}{\partial x} \right), \\ C &= \frac{c_i}{c_0}, \quad \alpha = 1 - \frac{D}{D_0}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 x 是交换深度, t 为离子交换扩散时间, c_i 为离子进入玻璃中的扩散浓度, c_0 为在玻璃中扩散后的总浓度, D 和 D_0 分别为进入和出去离子的自扩散浓度。根据文献^[4]可采用平均值法得到

$$\langle D/(1-\alpha C) \rangle_x = \frac{\int_{C(0,t)}^{C(\infty,t)} [D/(1-\alpha C)] dC}{\int_{C(0,t)}^{C(\infty,t)} dC} = \frac{D \int_0^\infty [D/(1-\alpha C)] (\partial C/\partial x) dx / \int_0^\infty dx}{\int_0^\infty D (\partial C/\partial x) dx / \int_0^\infty dx} = D \frac{\langle J_{NL} \rangle_x}{\langle J_L \rangle_x}, \quad (2)$$

其中 J_{NL} 为非线性离子流密度, J_L 为线性离子流密度。

用平均值代替(1)式中非线性因子^[4], 得

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad \tau = \int -D \frac{\lg[1-\alpha C(0,t)]}{\alpha C(0,t)} dt. \quad (3)$$

(3)式中是包括了非线性因子的, 如果 $\alpha \rightarrow 0$ (线性关系), 则 $\tau \rightarrow Dt$ (为一般线性方程)。

两步离子交换的已知边界条件是

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{C(0,t)} = 0, \quad C(\infty, t) = 0, \quad (4)$$

从而(3)式的解为

* 重庆市科学技术委员会基础应用项目资助课题。

E-mail: zigzhou@163.com

收稿日期: 2002-05-05; 收到修改稿日期: 2002-07-08

$$C[x, \tau(t)] = \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} \int_0^{\infty} C(x', 0) \left\{ \exp\left[-\frac{(x' + x)^2}{4\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(x' - x)^2}{4\tau}\right] \right\} dx', \quad (5)$$

其中 $C(x', 0)$ 为第一步离子交换后的离子浓度。

由此可得(3)式和(5)式是平均法得到非线性离子交换的重要结果。由于高斯函数分布^[1]是适用于离子交换中各种情况的,从而可以把它作为两步离子交换的初始条件:

$$C(x, t) = \frac{C(0, 0)}{\sqrt{1 + 4\tau/d_{sg}^2}} \exp\left[-\frac{x^2}{d_{sg}^2(1 + 4\tau/d_{sg}^2)}\right] = C(0, t) \exp\left[-\frac{x^2}{d^2(t)}\right]. \quad (7)$$

$$C(0, 0)d_{sg} = C(0, t)d(t).$$

这就是非线性离子交换下的离子浓度分布方程。

3 实验和分析

我们采用自制离子交换炉制作光功分器,第一步离子交换是用 K9 玻璃板在 510 °C 条件下与混合熔盐(质量比为 $Ti_2SO_4 : NaNO_3 = 5 : 1$)交换,工艺流程如图 1 所示。再清洗掉玻璃上的钛膜,然后在同温条件与纯盐 ($NaNO_3$) 进行第二次离子交换得到光功分器,如图 2 所示。最后切取光功分器(如图 2 所示)一个截面薄片(如图 1 中的 10 所示),进行抛光等工艺得到干涉片,用干涉仪测试交换后的折射率分布。

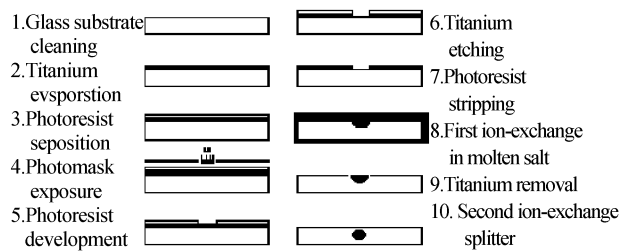


Fig. 1 Splitter manufacture by two-step ion-exchange technique

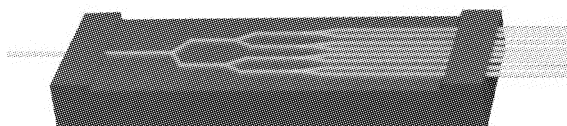


Fig. 2 1×8 glass optical power splitter by two-step ion-exchange

经过平均法求的值与两步离子交换后的实际值比较得到如图 3 所示情况。离玻璃表面越近的地方,其值符合得越好,离玻璃表面越深其值较差,但

$$C(x', 0) = C(0, 0) \exp(-x'^2/d_{sg}^2), \quad (6)$$

其中 $d_{sg} = \sqrt{4D_{sg}t_s}$ 为表面波导有效深度, D_{sg} 为高斯分布的有效扩散系数^[1], t_s 为离子交换总时间。有了(6)式作为已知条件后,(5)式就能进一步简化为

差值不太大。从而看出如果采用该法得到单模光功分器(线宽度小于 8 μm 为最佳)是较理想的选择。

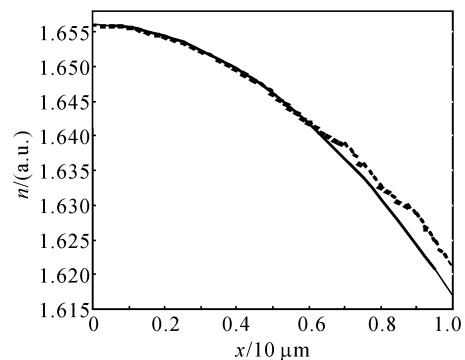


Fig. 3 Refractive index profiles after two-step ion-exchange for $\alpha = 0.85$. The real solution (full curve), the numerical solution with average method (dashed curve)

虽然有各种求解法^[5]如反 WKB 法^[6]能获得折射率值,但是计算较复杂,而且还是近似值。

结论 在非线性离子扩散方程中,平均法适用于两步离子交换制作光功分器等无源光波导器件的折射率分布求值,只要知道第一步离子交换的高斯分布就可以完全求出精确值,尤其对制作单模波导器件的折射率求值更为理想。避免采用其他烦琐的近似求解法求其折射率分布。

参 考 文 献

- 1 Najafi S I. *Introduction to Glass Integrated Optics*. London: Artech House, 1992, chap. 1~2
- 2 Albert J, Yip G L. Insertion loss reduction between single-mode fibers and diffused channel waveguide. *Appl. Opt.*, 1988, 27(23):4837~4843
- 3 Prieto X, Montero C, Liñares J. Three-step diffused

- surface waveguide for fabricating and designing integrated optical components. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(11):2159~2163
- 4 Montero C, Liñares J, Prieto X *et al.*. Modelling of thermal annealing of ion-exchanged surface waveguides by an averaging approach. *Pure Appl. Opt.*, 1998, **7**(1):15~21
- 5 Albert J, Yip G L. Refractive-index profiles of planar waveguide made by ion-exchange in glass. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(22):3692~3693
- 6 Liñares J, Righini G C, Alvarellos J E. Modal coupling analysis for integrated optical components in glass and lithium niobate. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25):5292~5298

Refractive Index Profiles of Two-Step Ion-Exchange Glass Power Splitter

Zhou Zigang^{1,2} Liu Desen²

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

(Received 05 May 2002; revised 08 July 2002)

Abstract: An average method is applied to the nonlinear diffusion equation to obtain nonlinear analytical models for the index profiles of two-step ion-exchange splitters. In this way, the models obtained can predict the index profile after two-step exchanging from the first surface index profile (initial condition), which makes a fine curve with Gaussian function.

Key words: guiding wave optics; two-step ion-exchange; glass power splitter; average method; nonlinear diffusion equation; Gaussian function