

抛物型折射率包层的铌酸锂单晶光纤

阙文修 姚 熹

霍玉晶

(西安交通大学电子材料研究室, 西安 710049) (清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 利用镁离子内扩散的方法, 实现了铌酸锂单晶光纤具有抛物型折射率包层的波导结构。

对扩散层中的镁离子浓度分布进行了理论模拟, 理论和实验结果相符合。

关键词 晶体光纤, 镁离子内扩散, 波导结构, 理论模拟。

1 引 言

为了使铌酸锂单晶光纤更有效地应用于非线性光学和激光器件, 晶纤必须具有芯-包层的波导结构, 包层晶纤可以减小光散射损耗和传播模式数。但是到目前为止, 在国内还未见到有关晶纤包层研究报告, 国外近年来已开展了这方面的研究工作^[1~3]。本文作者认为镁离子内扩散法^[4]是实现铌酸锂晶纤最为有效的包层法, 因为镁离子内扩散不但降低了镁扩散层 o 光和 e 光的折射率, 而且随着扩散过程会自然地增加交界面的平滑度。从而可大大减小光散射损耗和传播模式数。

2 抛物折射率包层的实现

用于包层实验的铌酸锂晶纤是由激光加热基座法沿 C 轴方向生长, 直径为 $90\ \mu\text{m}$ 。包层是通过下列过程制备。1) 晶纤在 1050°C 的温度下退火 $3\ \text{h}$, 以消除晶纤内部残余应力和缺陷等; 2) 在退火后的晶纤侧表面沉积上一层氧化镁(MgO)膜; 3) 与退火时一样的工艺进行镁离子内扩散。1)和3)步实验过程必须在富锂气氛中进行, 以抑制铌酸锂晶纤表层氧化锂的外扩。这是因为铌酸锂的 e 光折射率会随着氧化锂(Li_2O)从晶体中脱离而增加^[5], 这对用镁离子内扩散来降低晶纤表层折射率以实现其包层结构是极为不利的, 所以必须抑制 Li_2O 的外扩散。实验中根据 Juichi Noda^[6]等人的报道, 对于 $(\text{Li}_2\text{O})_x(\text{Nb}_2\text{O}_5)_{1-x}$, 当 x 接近 0.5 时烧结而成的陶瓷样品, 其中的 Li_2O 特别容易脱离表面。这是因为在高温下铌酸锂陶瓷粉末中松弛状的未受约束的 Li_2O 分子易倾向脱离表面, 既然陶瓷粉末比晶纤具有更多的表面积, 所以由陶瓷粉末导致的 Li_2O 蒸气压足以形成一个富 Li_2O 气氛, 以达到抑制晶纤中锂的外扩散。

镁扩散层中镁离子浓度分布是由电子探针显微分析(EPMA)来定性的分析, 图1是扩散参数为 MgO 膜厚 $\tau = 400\ \text{nm}$, 扩散温度 $T = 1050^\circ\text{C}$, 扩散时间 $t = 30\ \text{h}$ 的实验结果。图1(a)

* 西安交通大学精细功能电子材料与器件实验室开放基金资助项目。

收稿日期: 1994年4月29日; 收到修改稿日期: 1994年6月15日

是晶纤端面的二次电子照片，从照片中可见边缘一圈稍不同于纤芯，这可能是含有一层富 MgO 层的缘故。图 1(b)是对应图 1(a)的镁扩散层中镁离子浓度随晶纤半径方向分布的 EPMA 波谱照片，可见镁离子浓度分布从晶纤表层往纤芯方向是逐渐变化的，接近于半抛物型分布，因为此时镁离子还未扩散到纤芯。一般来说扩散层中镁离子浓度分布形状取决于扩散参数和晶纤直径。对于一定的 MgO 膜厚，扩散温度低，扩散时间就很长，甚至难以扩散进去。扩散温度高固然可缩短扩散时间，但扩散温度太高，接近铌酸锂的居里温度时，会退化晶纤的光学质量。经过大量的探索实验，认为以 1050~1100°C 温度下进行镁离子内扩散为佳。图 2 为扩散参量 $T = 1100^{\circ}\text{C}$, $t = 35\text{ h}$, $\tau = 500\text{ nm}$ 的实验结果。

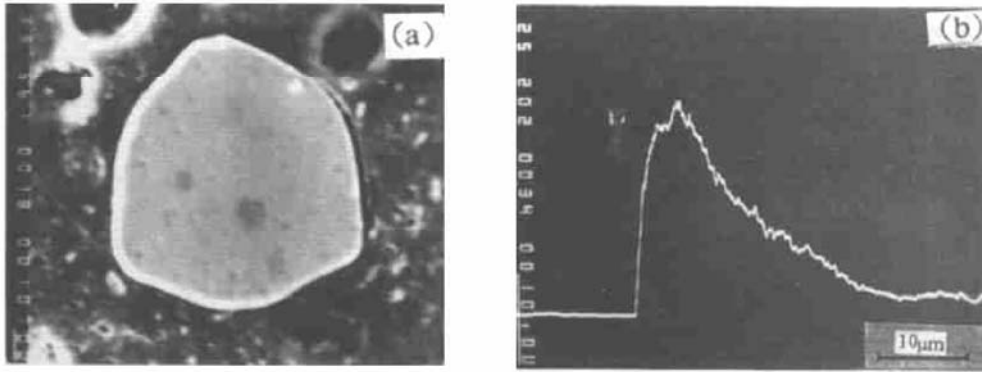


Fig. 1 Diffusion parameters: $T = 1050^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ h}$, $\tau = 400\text{ nm}$

- (a) Second electron photograph of the end face of the c-axis, 90 μm LiNbO₃ single crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding
- (b) EPMA spectrum photograph of Mg-ion concentration distribution along radial direction

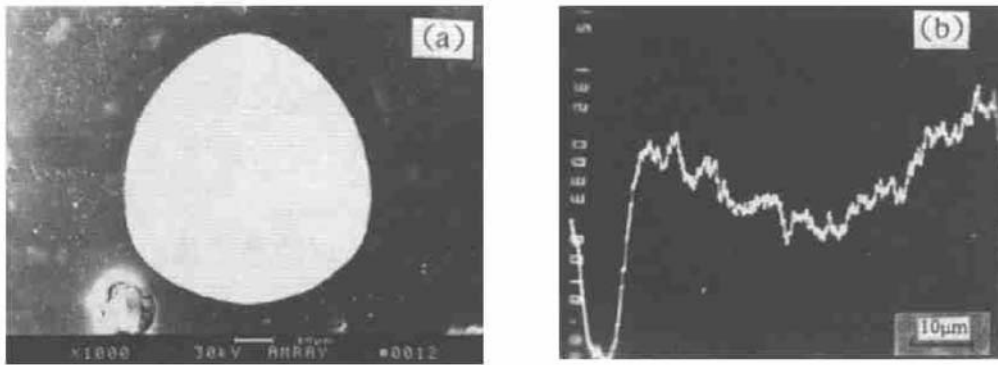


Fig. 2 Diffusion parameters, $T = 1100^{\circ}\text{C}$, $t = 35\text{ h}$, $\tau = 500\text{ nm}$

- (a) Backscattering electron photograph of the end face of the c-axis, 60 μm LiNbO₃ single crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding.
- (b) EPMA spectrum photograph of Mg-ion concentration distribution along diameter direction

图 2(a)是晶纤端面的背散射照片，从照片上看不出镁的扩散层和纤芯有何不同，这表明镁离子已完全扩进去，图 2(b)是扩镁晶纤的镁离子沿直径方向的分布曲线，可见此时镁离子已完全扩进到纤芯，即为抛物型分布。

根据 Midwinter^[7] 的实验报道，镁的扩散层中镁离子浓度与折射率的关系有

$$n = n_0 - AC \tag{1}$$

式中 n_0 为晶纤原来的折射率， C 为镁离子浓度， A 为特征参数。图 3 和图 4 即为根据(1)式和图 1(b)的图 2(b)的实验结果，依镁离子浓度分布折算成的折射率分布，从图中可看出铌酸锂晶纤经镁离子内扩散后，折射率为抛物型分布。

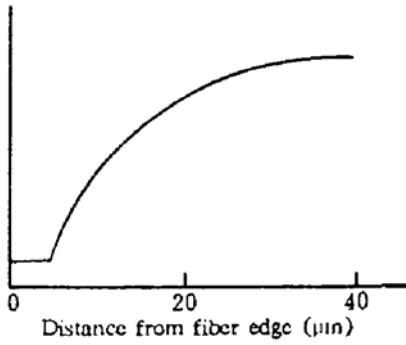


Fig. 3 Refractive index profile of crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding in Fig. 1

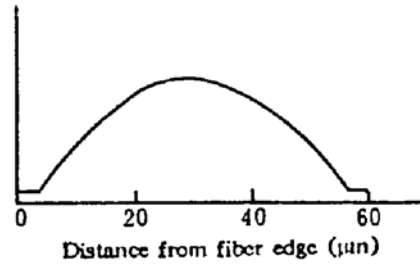


Fig. 4 Refractive index profile of crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding in Fig. 2

3 镁离子浓度分布的理论模拟

晶纤径向扩散方程为(设晶纤是无限长)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (D \frac{\partial C}{\partial r}) \tag{2}$$

式中 C 为镁离子浓度, t 为扩散时间, D 为扩散系数即作为常数。若认为在扩散过程中晶纤表面的镁离子浓度 C_0 不变, 即当作恒定源扩散, 则扩散边界条件为(a 为晶纤半径)

$$\begin{cases} C(r, 0) = 0 & 0 \leq r \leq a, t = 0 \\ C(a, t) = C_0 & r = a, t > 0 \end{cases} \tag{3}$$

根据数理方程理论, (2)式的泛定方程空间部分为柱贝塞耳方程, 其解即为柱贝塞耳函数, 而时间部分为指数函数, 并利用(3)式的边界条件即可得到(2)式的解为

$$C(r, t) = C_0 - 2C_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n r/a)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp(-\frac{Dt}{a^2} \beta_n^2) \tag{4}$$

上式中 J_0 和 J_1 分别为零阶和一阶贝塞耳函数, β_n 是零阶贝塞耳函数 $J_0(\beta_n)$ 的第 n 个根(即零点), 考虑到(4)式中的指数部分收敛极快, 仅取 $n = 1$ 即可, 并令

$$K = Dt/a^2 \tag{5}$$

这里 K 定义为扩散程度参量, 由此 $n = 1$ 时镁离子浓度分布的理论模拟结果如图 5 示(图中的 0.005 ~ 0.12 表示 K 取值)

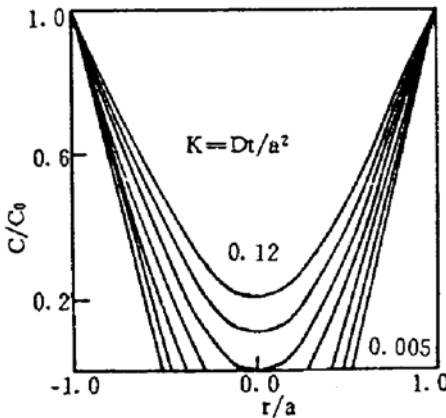


Fig. 5 Theoretical simulation of Mg-ion concentration profiles

从图 5 中的镁离子浓度理论模拟结果可以看出, 对于一定的 MgO 膜厚和晶纤直径, 随着扩散程度量 K 的增大, 镁离子浓度分布越来越接近抛物型分布, 这和图 1、图 2 中的实验结果是一致的。从图 5 中还可得到当 $K \approx 0.08$ 时, 镁离子刚好扩散到晶纤芯的中心, 此时镁离子浓度分布刚好为二次抛物型。

总 结 通过利用镁离子内扩散铈酸锂单晶光纤, 实现了晶纤具有抛物型折射率分布的芯-包层波导结构, 从实验证实了折射率分布形状随扩散参数(扩散温度、扩散时间、MgO 膜厚等)的不同而有所改变; 并经过大量的探索实验, 认为扩

散温度以 1050~1100°C 为佳。对镁离子浓度分布进行了理论模拟，基本和实验结果相符合。

参 考 文 献

- [1] S. Sudo, A. Cordova-plaza, R. L. Byer *et al.*, MgO : LiNbO₃ single crystal fiber with magnesium-ion indiffused cladding. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11) : 938
- [2] S. Sudo, I. Yokohama, A. Cordova-plaza *et al.*, Uniform refractive index cladding for LiNbO₃ single crystal fiber. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20) : 1931
- [3] D. P. S. Saini, Y. Shimoji, R. S. F. Chang *et al.*, Cladding of a crystal fiber by high-energy ion implantation. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14) : 1074
- [4] Huichi Nada, Masaharu Fukuma, Shoichi Saito, Effect of Mg diffusion on Ti-diffused LiNbO₃ waveguides. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(6) : 3150
- [5] J. R. Carruthers, G. E. Peterson, M. Grasso *et al.*, Nonstoichiometry and crystal growth of lithium niobate. *J. Appl. Phys.*, 1971, **42**(5) : 1846
- [6] Juichi Nada, Naoya Uchida, Shoichi Saito *et al.*, Electro-optic amplitude modulation using three-dimensional LiNbO₃ waveguide fabricated by TiO₂ diffusion. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(1) : 19
- [7] J. E. Midwinter, Lithium Niobate, Effect of composition on the refractive indices and optical second-harmonic generation. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(7) : 3033

Lithium Niobate Single Crystal Fiber with Parabolic Refractive Index Cladding

Que Wenxiu Yao Xi

(*Electronic Materials Research Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

Huo Yujing

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 29 April 1994; revised 15 June 1994)

Abstract Lithium niobate single crystal fiber with parabolic refractive index profile cladding is achieved by using Mg-ion indiffusion process. Mg-ion concentration profiles of the magnesium diffused layer by theoretical simulation are close to the experimental results.

Key words crystal fiber, Mg-ion indiffusion, waveguide structure, theoretical simulation.