

# 铌酸锂单晶光纤包层的实现及其光学特性\*

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)

**提要** 利用镁离子内扩散方法, 实现了铌酸锂单晶光纤具有抛物折射率分布的芯-包层波导结构, 并对镁离子内扩散包层后的晶纤进行了损耗测量, 测得其损耗系数比镁离子内扩散前降低 14 dB/cm 的好结果。此外, 还对镁离子内扩散前后晶纤的光斑形状进行了观察和比较。

**关键词** 晶体光纤, 镁离子内扩散, 抛物折射率包层, 光损耗, 光斑

## 1 引 言

由于铌酸锂单晶光纤所特有的特性, 使得它在非线性光学和激光器件中的应用具有极大的吸引力。无疑具有芯-包层波导结构的晶纤, 可以容易地和光学系统集成。然而, 到目前为止, 在国内还未见到有关单晶光纤包层研究的文章报道, 国外近年来已开始了一些这方面的研究工作<sup>[1~3]</sup>, 但这些作者所报道的仅是实现晶纤包层的方法, 而并未对包层后的晶纤特性作进一步研究。本文利用镁离子内扩散方法, 实现了铌酸锂(LN)单晶光纤具有抛物折射率分布的芯-包层波导结构, 并对通过镁离子内扩散包层后的晶纤进行了损耗测量, 得到了比镁离子内扩散前晶纤损耗系数降低约 14 dB/cm 的好结果, 此外还对镁离子内扩散前后, 晶纤的出射光斑形状进行了观察和比较。

## 2 抛物折射率包层的实现

实验用的 LN 单晶光纤是由激光加热基座法(LHPG)生长。在这一方法中, 一束 CO<sub>2</sub> 激光通过 360°轴向对称辐射以熔化原料棒的端面, 使得在端面形成一个熔区。然后一个沿 c 轴方向生长的导向籽晶浸入到熔区, 通过提拉籽晶离开熔体, 同时料棒送入熔区, 控制提拉速度和送料速度比及多次重复生长, 可得到沿 c 轴方向生长的实验用晶纤。

晶纤包层通过下列三个过程进行: 第一步, 晶纤在 1050 °C 温度下退火 3 h, 以消除内部残余应力和缺陷等; 第二步, 在退火后的晶纤侧表面沉积上一层氧化镁(MgO)膜; 第三步, 在 1050 °C 温度下进行镁离子内扩散。

值得注意的是第一和第三步实验过程必须在富锂(Li<sub>2</sub>O)气氛中进行, 以抑制 LN 晶纤表层

\* 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。

锂离子的外扩散。这是因为 LN 的非常光折射率随着  $\text{Li}_2\text{O}$  从体内脱离而增加<sup>[4]</sup>。显然,这对用镁离子内扩散来降低 LN 表层折射率以实现其晶纤包层结构是极为不利的,所以必须加以抑制,具体方法可参见文献[5]。

镁的扩散层的折射率分布形状(镁离子浓度分布形状)关键在于扩散参数的匹配,即  $\text{MgO}$  膜厚、扩散温度、扩散时间的匹配,其和镁离子浓度关系有<sup>[6]</sup>。

$$n(r) = n_0 - AC(r) \quad (1)$$

式中  $n(r)$  为经镁离子内扩散后晶纤包层的折射率,  $n_0$  为晶纤原来折射率,  $A$  为特征常数,  $C(r)$  为镁的扩散层镁离子浓度,  $r$  为晶纤半径。由式(1)可见,若知道了镁扩散层镁离子的浓度分布,即可得到晶纤包层的折射率分布。

镁的扩散层镁离子浓度分布由电子探针显微分析(EPMA)测量。测试前晶纤端面必须严格按光学研磨工艺抛光,再在抛光面上喷上一薄层金膜方可进行 EPMA 测试。

图 1 是经镁离子内扩散后,晶纤端面的背散射照片,其放大倍数为  $300\times$ 。从照片上看不出镁的扩散层和纤芯有什么不同,这和文献[1]的结果是一致的,但从透射光的光学显微照片中可看出镁的扩散层和纤芯的不同(见图 5),从图 5 可见纤芯处 LN 晶纤的三个生长晶棱已基本消失。图 2 是随扩散深度(沿晶纤表面往纤芯的半径方向)镁离子浓度分布的 EPMA 波谱照片,其放大倍数为  $1200\times$ 。晶纤进行镁离子内扩散的扩散参数为  $\text{MgO}$  膜厚  $400\text{ nm}$ , 扩散温度  $1050\text{ }^\circ\text{C}$ , 扩散时间  $30\text{ h}$ 。从图 2 的照片上可以看出,从晶纤表层沿半径方向到纤芯,镁离子浓度的分布基本接近半抛物形分布。结合(1)式,表明晶纤包层的折射率分布也呈抛物形分布,而且这一形状随着扩散参数如  $\text{MgO}$  膜厚、扩散温度和扩散时间的变化而有所改变<sup>[5]</sup>。

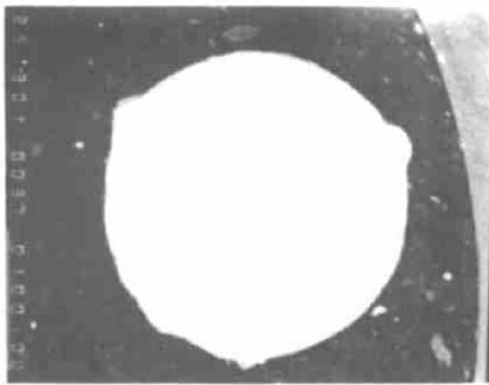


Fig. 1 Backscattering electron photograph of the end face of the C-axis,  $\text{LiNbO}_3$  single crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding

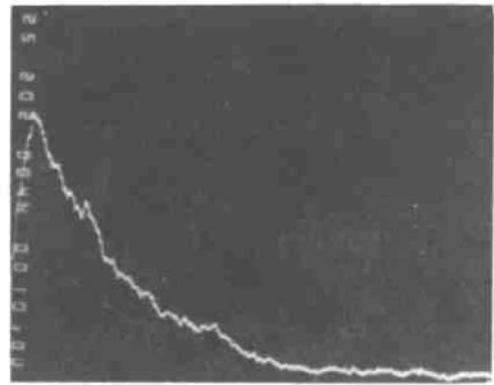


Fig. 2 EPMA photograph of Mg-ion concentration versus diffusion depth

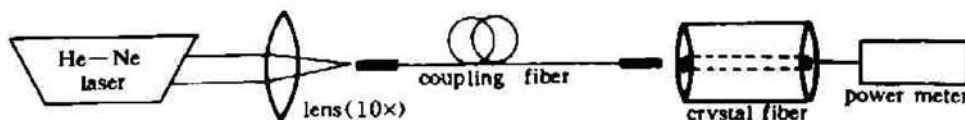


Fig. 3 Experimental setup of crystal fiber loss measurement

### 3 晶纤损耗测量

图 3 是晶纤损耗测量的实验原理图,由氦氖激光器输出的激光( $\lambda = 0.6328\text{ }\mu\text{m}$ )。经显微镜透镜耦合入石英光纤(耦合光纤),由石英光纤出射的光直接入射到被测的 LN 单晶光纤,最后



由光功率计测量经晶纤出射的光功率。实验用作耦合光纤的石英光纤,其芯径为  $16.4 \mu\text{m}$ ,而晶纤直径为  $200 \mu\text{m}$ (图 1)。所以在光功率的测量中可以认为石英光纤输出的光全部入射到 LN 晶纤内,也即把石英光纤输出的光功率作为 LN 晶纤的入射光功率,以进行晶纤损耗计算。石英光纤的出射光功率设为  $P$ ,晶纤出射光功率设为  $P_0$ ,则晶纤总损耗系数定义为

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (\text{dB/cm}) \quad (2)$$

式中  $L$  为晶纤的长度,单位为厘米,实验中为了尽量消除一些人为因素给测量光功率时引入的误差,采取对  $P$  和  $P_0$  测多组数据,取其比值的平均值代入(2)式进行计算。对图 1 经镁离子内扩散后的包层晶纤损耗系数进行了测量,其结果为

$$\alpha = 1.12 \text{ dB/cm} \quad (3)$$

为了便于比较,对和图 1 同一根生长,但未进行镁离子内扩散的晶纤,也进行了其光损耗系数的测量,结果为

$$\alpha = 15.56 \text{ dB/cm} \quad (4)$$

由(3)和(4)式可见,对于直径为  $200 \mu\text{m}$  的晶纤,在扩散参数为 MgO 膜厚  $400 \text{ nm}$ ,扩散温度  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  下进行镁离子内扩散  $30 \text{ h}$ ,其光损耗系数比同一根生长,但未进行镁离子内扩散的晶纤损耗系数降低  $14 \text{ dB/cm}$ 。

## 4 光斑形状观察

晶纤出射光斑形状的观察,可直接在图 3 中进行,即把图 3 中的光功率计换成观察屏直接进行观察,结果示于图 4。图 4(a) 是经镁离子内扩散前,晶纤出射光的光斑形状,从照片上可看出呈六瓣形。这是因为沿  $c$  轴方向生长的晶纤有三个生长晶棱的缘故。图 5(a) 是对应图 4(a) 的晶纤端面的光学显微照片,显然当入射光进入到这些生长晶棱时,由这些生长晶棱及其对称点的光均被散射掉,从而出现图 4(a) 的结果,很明显这些生长晶棱极大地影响了晶纤的光损耗,式(4)的结果也正好说明了这一点。但晶纤经镁离子内扩散实现包层后,其出射光的光斑形状基本上呈圆形[图 4(b)],这从图 5(b) 对应该晶纤端面的光学显微照片也能说明这一点,即图 5(b) 的光学显微照片表明随着镁离子的内扩散和晶纤包层的形成,使得在纤芯处的三个生长晶棱已基本消失,从而得到图 4(b) 的结果,这无疑可大大减小晶纤的光损耗,正如式(3)的结果,光损耗比镁离子内扩散前每厘米减小了约  $14 \text{ dB}$ 。

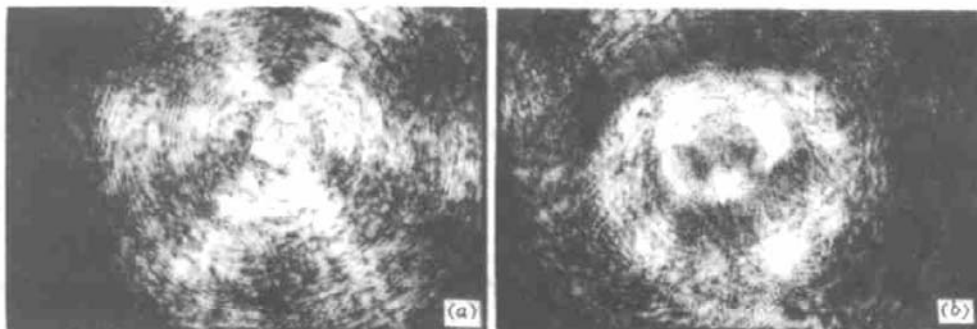


Fig. 4 Output optical beam patterns of a crystal fiber

(a) without Mg-ion indiffused cladding; (b) with Mg-ion indiffused cladding

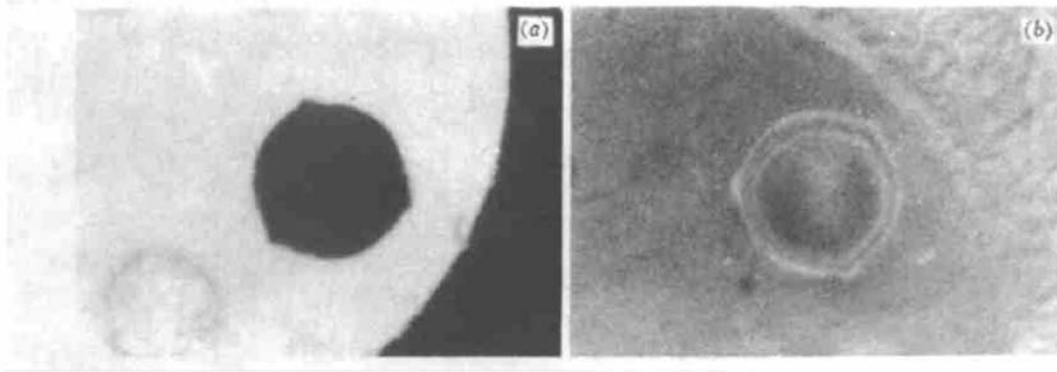


Fig. 5 Optical photograph of the crystal fiber end face  
(a) without Mg-ion indiffused cladding; (b) with Mg-ion indiffused cladding

### 参 考 文 献

- 1 S. Sudo, A. Cordova-plaza, R. L. Byer *et al.*. MgO : LiNbO<sub>3</sub> 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 LiNbO<sub>3</sub> 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 J. R. Carruthers, G. E. Peterson, M. Grasso *et al.*. Nonstoichiometry and crystal growth of Lithium niobate. *J. Appl. Phys.*, 1971, 42(5) : 1846
- 5 阙文修, 霍玉晶, 姚 薰. 阶跃折射率包层的铌酸锂单晶光纤. *中国激光*, 1994, A21(12) : 953
- 6 J. E. Midwinter. Lithium niobate; Effect of composition on the refractive indices and optical second-harmonic generation. *J. Appl. Phys.*, 1968, 39(7) : 3033

## Achieving of Lithium Niobate Single Crystal Fiber Cladding and Its Optical Characteristics

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)

**Abstract** A core-cladding waveguide structure of the Lithium niobate single crystal fiber with parabolic refractive index profile is achieved by a Mg-ion indiffusion process. The propagation loss of the cladded crystal fiber is measured, and its loss coefficient is about 14 dB/cm lower than that of the uncladded crystal fiber. The output optical beam patterns of the cladded and uncladded crystal fibers are observed. It is found that three ridges of the cladded crystal fiber core have disappeared gradually in the Mg-ion indiffusion process.

**Key words** crystal fiber, Mg-ion indiffusion, parabolic refractive index cladding, optical loss, optical beam patterns