

# LD 泵浦的 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤腔外 倍频激光器 \*

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** 通过镁离子内扩散方法, 实现了沿  $a$  轴生长的 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤具有阶跃折射率分布的芯-包层波导结构。并研制成 LD 泵浦的该包层单晶光纤室温腔外倍频激光器, 在 19 mW 的 1.064  $\mu\text{m}$  入射光功率下, 得到 10  $\mu\text{W}$  的 0.532  $\mu\text{m}$  的连续绿光输出。

**关键词** Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤, 镁离子内扩散, 包层, LD 泵浦, 倍频激光器, Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体

## 1 引言

Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶体集 LiNbO<sub>3</sub> 优良的电光与非线性光学特性和 Nd<sup>3+</sup> 的理想激光特性于一身, 从而引起了人们极大关注。文献[1~4]的作者已对这一晶体器件的研究产生了极大兴趣, 并开展了一些研究工作。近年来, 随着晶体光纤的出现以及晶体光纤的特有的特性, 晶体光纤又成为人们研究的热点。特别是 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤对于倍频激光器、 $Q$  开关和自调制激光器等具有潜在的应用。然而目前已生长的 LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤不具有包层, 在生长过程中出现的生长晶棱以及晶纤直径的波动, 使得晶纤的传输光损耗大, 透光性能差, 从而限制了它的器件应用, 特别是 LD 作为泵浦源的 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶纤激光器至今尚未见到有关报道。本文利用镁离子内扩散方法, 通过选择适当的扩散参数和晶纤直径, 实现了  $a$  轴向生长的 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤具有阶跃折射率分布的芯-包层波导结构。然后以 LD 为泵浦源, 实现了该包层 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤的室温腔外倍频激光器。

## 2 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤的包层

Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤由激光加热基座法生长<sup>[5]</sup>。晶纤包层的具体实现过程, 作者已在文献[6]中作了详细报道。值得注意的是文献[6]中的晶纤是沿  $c$  轴方向生长, 而且没有任何掺杂的纯 LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤。本文的晶纤是沿  $a$  轴方向生长且本身就掺了一定量 MgO (5

\* 西安交通大学精细功能电子材料与元器件开放实验室基金资助项目。

mol-%)和 Nd 的双掺 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤,所以实验过程的不同关键在于扩散参数的不同。

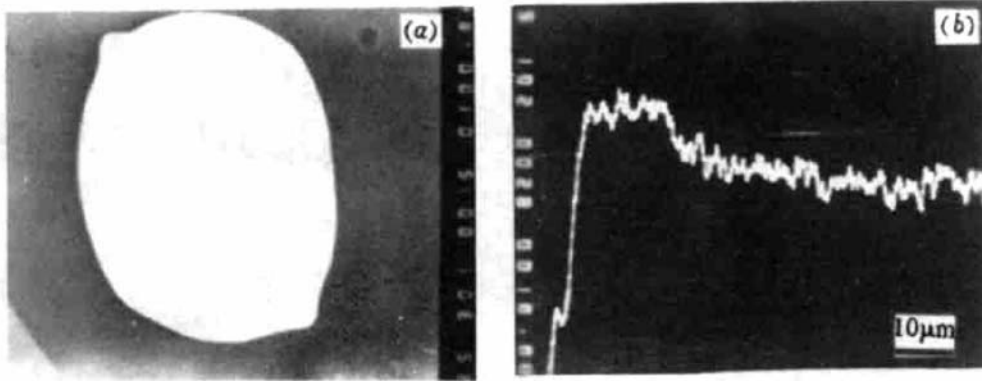


Fig. 1 Diffusion parameters; diffusion temperature  $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
diffusion time  $t = 35\text{ h}$ , and MgO film thickness  $t = 500\text{ nm}$

(a) Backscattering electron photograph of the end face of a  $a$ -axis,  $200 \times 150\text{ }\mu\text{m}$ , Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> single crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding; (b) EPMA spectrum of Mg-ion concentration profile along the short-axis diffusion depth

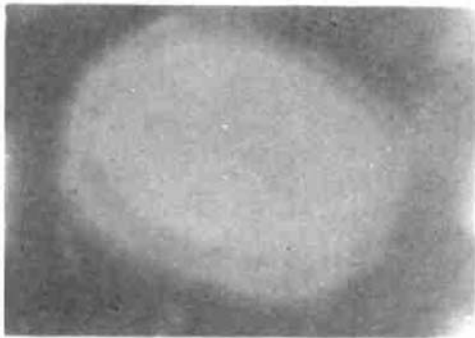


Fig. 2 Optical photograph of transmission light of the  $a$ -axis,  $200 \times 150\text{ }\mu\text{m}^2$  Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> single crystal fiber with Mg-ion indiffused cladding

图 1 (a) 是 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤经镁离子内扩散后,晶纤端面的背散射电子照片,从照片上看不出镁的扩散层和未扩镁的纤芯有何不同,但从这一扩镁晶纤的透射光的光学显微照片中可以看出它们的差别。如图 2 所示晶纤透射光照片的外边缘有一圈稍暗淡于未扩镁的纤芯,虽不很清晰,但可以区别开来,这一结果和文献[7]的结果是一致的。而且从这一照片上还可看出,晶纤的生长晶棱对透射光的影响已经消除,晶纤的有效芯径已经减小,这些无疑可大大减小光传输损耗。图 1(b) 是对应图 1(a) 中晶纤从表面沿短轴方向到纤芯镁离子浓度分布的电子探针显微分析(EPMA)波谱照片。可见镁离子

浓度呈阶跃形分布,镁离子扩散深度约为  $15\text{ }\mu\text{m}$ 。由于晶纤本底已掺入了一定的 MgO 量,使得镁的扩散层和未扩镁的纤芯 MgO 含量差很小,从而导致图 2 的结果即镁的扩散层和未扩镁的纤芯区别不明显。

对图 1 包层晶纤进行了损耗测量,其结果为  $1.80\text{ dB/cm}$ ,为了便于比较对包层前晶纤也进行了其光损耗的测量,结果为  $11.20\text{ dB/cm}$ 。可见晶纤经镁离子内扩散实现包层后其单位厘米上的光传输损耗比包层前的光传输损耗降低了 6 倍。实验中发现影响晶纤光损耗除了前面提到的晶纤的生长晶棱和晶纤的直径波动外,还有一点值得注意的是晶纤经镁离子内扩散首先在表面富 MgO 层形成一未知中间相,经实验证实这一未知中间相是镁离子内扩散的真正扩散源。因此在进行镁离子内扩散时,一定要控制适当,使得镁离子扩散完全即保证这一未知中间相完全消失,否则这一未知中间相会作为光的散射面,反而增大晶纤的光损耗。

### 3 包层 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤的腔外倍频激光器

图 3 为 LD 泵浦的包层 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤腔外倍频激光器实验装置光路图。主要由控温系统 1, 激光二极管 2, 聚焦系统 3, 输入端反射镜 4, Nd : YVO<sub>4</sub> 激光晶体 5, 增透膜 6, 输出端反射镜 7, 显微物镜 8, Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤 9, 光功率计 10 组成。其中输入端反射镜是直接镀在 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体靠近聚焦系统的端面上的平面介质膜反射镜, 它对波长 1.064 μm 的振荡激光为全反射, 对 LD 的泵浦激光 0.805 μm 为高透射(透射率~75%); 输出端反射镜是一面独立放置的介质膜球面反射镜, 曲率半径为 50 mm, 它对 1.064 μm 全反射, 并和输入端介质膜反射镜共同组成激光谐振腔。

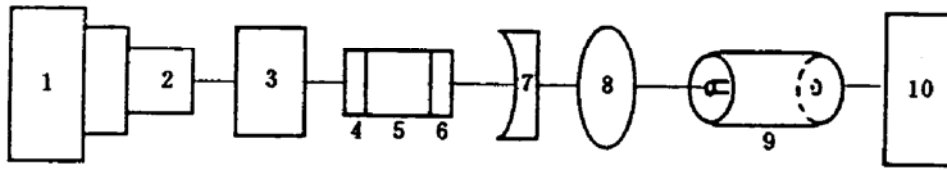


Fig. 3 Experimental setup for the LD pumped Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> single crystal fiber frequency doubled laser

1: temperature controller; 2: LD; 3: focus system; 4: input mirror; 5: Nd : YVO<sub>4</sub> laser crystal; 6: film;  
7: output mirror; 8: lens; 9: Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> crystal fiber; 10: powermeter

选取 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光晶体以产生 1.064 μm 的近红外基频光, 对 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤进行倍频, 是考虑到 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体在 1.064 μm 处具有一个大的激励辐射截面<sup>[9]</sup>; 以及 LD 泵浦这一晶体的 π 偏振吸收效率是所有已研究的激光材料中最高的一个<sup>[9]</sup>; Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体还是目前作为激光介质通过 LD 泵浦获得最高效率、最低阈值和具有大约 21 nm 吸收宽度的激光器件材料<sup>[10]</sup>, 从而使其激光器件允许 LD 有较大的波长漂移范围。

LD 的光束在与其有源区平面平行和垂直的两个平面内的发散角相差很大(分别为 10°和 35°), 因此它的光束横截面形状和圆形相差很远。显然 LD 激光束的这种形状将使激光器的效率很低。所以设计适当的泵浦光路和聚焦系统, 以改变 LD 激光光束截面形状, 使之接近圆形并把它聚焦到 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光晶体内部以提高激光器的效率是很重要的。

用于倍频激光器的 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶光纤的制备。首先将晶纤用光学环氧胶胶合在玻璃小试管内, 等粘接牢固后用金刚砂对小试管两端面进行研磨。直到在显微镜下观察晶纤端面出现均匀麻点后, 再改用人造金刚石研磨膏进行晶纤端面抛光。值得注意的是在这些工艺过程中应尽量避免晶纤端面崩边和保证晶纤两端面垂直, 最终加工好的晶纤长为 12 mm, 横截面为 200×150 μm<sup>2</sup>。

前面分析可见, 实验的第一步是得到 LD 泵浦(1 W, 0.805 μm)的 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体激光器 1.064 μm 的近红外光输出。这首先要根据材料的吸收系数截取适当长度的晶体, 然后将其两端面加工成光学面, 并在两端面上分别镀制输入端反射镜和增透膜, 以降低泵浦光的损耗。加工好的 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体通光方向长度为 1 mm, 端面为 3 mm×3 mm 的长方体。然后用 He-Ne 激光来准直激光二极管(LD)、聚焦系统、Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体和输出反射镜。直到所有这些元件处于同轴, 方可把 He-Ne 激光器移去, 并点上 LD。当从输出反射镜端出现 1.064 μm 的激光时, 再减小 LD 的泵浦功率, 并精细地调节各个元件的位置, 以确保 1.064 μm 的光输出功率达到最高。第二步工作是利用显微物镜(40×)把 1.064 μm 的激光耦合进 Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> 单晶

光纤,经过仔细调节耦合透镜和单晶光纤的位置,可在 Nd : MgO : LNbO<sub>3</sub> 晶纤出射端得到 0.532 μm 的倍频绿光输出。通过改变泵浦光的聚焦状态,使泵浦光和振荡光模式很好地匹配,直到从输出反射镜达到 19 mW 最大的 1.064 μm 基频光输出时,便可在 Nd : MgO : LNbO<sub>3</sub> 晶纤出射端得到 10 μW 的 0.532 μm 倍频绿光输出。当然在这一倍频二次谐波输出的测量中,应在 Nd : MgO : LNbO<sub>3</sub> 晶纤输出光路上加上滤光片,以滤去可能漏出的基频光,并把光功率计放在滤光片后进行倍频二次谐波功率的测量。由于 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体输出的 1.064 μm 基频光是线偏振光,同时 Nd : MgO : LNbO<sub>3</sub> 晶纤是利用 I 类位相匹配实现倍频,所以由光孔效应和由显微物镜作为耦合系统导致基频光发散所引起的相位失配都将大大降低系统效率,再考虑到晶纤端面加工质量问题,使得入射光在晶纤端面至少将有 10% 以上的反射损耗以及基频光经透镜聚焦到晶纤端面光斑远大于晶纤的横截面,使得实际进入晶纤的基频光功率远小于 19 mW,估计远在 10 mW 以下,所以使倍频转换效率明显地低。当然还有一点值得注意的是在晶纤包层中提到的即作为镁离子内扩散真正扩散源的未知的中间化合物,若未能完全消失,无疑也将降低倍频转换效率。

由前面知道,本研究用于倍频激光器的 Nd : MgO : LNbO<sub>3</sub> 单晶光纤长为 12 mm,横向尺寸为 200×150 μm<sup>2</sup>,经镁离子内扩散包层后,除去镁离子内扩散深度约 15 μm [图 1(b)],有效的纤芯截面为 170×120 μm<sup>2</sup>,仍然还比较大。可见其倍频光的横模场为多模,实验中也观察到确实为多模,只是由于倍频光功率比较低,未能把模式照片照下来。而且在实验中发现,LD 泵浦光的功率在一定范围内变化对倍频光横模的影响不是很大,但通过显微物镜 8 对基频光的聚焦状态,以及和晶纤的耦合位置对倍频光的影响比较大。实验中还观察到通过改变基频光的聚焦状态,可看到倍频光的横模场由二个半圆形组成,而且随着倍频光横模的转变,其输出功率也发生变化。

### 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, A. Cordova-plaza, M. J. F. Digonnet *et al.*. Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> spectroscopy and laser devices. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, 3(1) : 140~147
- 2 A. Cordova-plaza, T. Y. Fan, M. J. F. Digonnet *et al.*. Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> continuous-wave laser pumped by a laser diode. *Opt. Lett.*, 1988, 13(3) : 209~211
- 3 J. Q. Yao, W. Q. Shi, J. E. Millerd *et al.*. Room-temperature 1.06-0.53 μm second-harmonic generation with MgO : LiNbO<sub>3</sub>. *Opt. Lett.*, 1990, 15(23) : 1339~1341
- 4 徐观峰,巩马里,郭永金等. Nd : MgO : LNbO<sub>3</sub> 的折射率测量和室温自倍频激光器. *中国激光*, 1991, 18(5) : 324~328
- 5 M. M. Fejer, J. L. Nightingale, G. A. Magel *et al.*. Laser-heated miniature pedestal growth apparatus for single crystal optical fibers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1984, 55(11) : 1791~1796
- 6 阙文修,霍玉晶,姚 熹. 阶跃折射率包层的铌酸锂单晶光纤. *中国激光*, 1994, 21(12) : 953~956
- 7 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) : 1931~1933
- 8 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher *et al.*. Simulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd : YVO<sub>4</sub>. *J. Appl. Phys.*, 1977, 48(12) : 4907~4911
- 9 Norman P. Barnes, Mark E. Storm, Patricia L. Cross *et al.*. Efficiency of Nd laser materials with laser diode pumping. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1990, QE-26(3) : 558~569
- 10 R. A. Fields, M. Birnbaum, C. L. Fincher. Highly efficient Nd : YVO<sub>4</sub> diode-laser end-pumped laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(23) : 1885~1886

## A Laser Diode Pumped Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> Single Crystal Fiber Extracavity Frequency Doubled Laser

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 a-axis, Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> single crystal fiber with step refractive index profile is achieved by a Mg-ion indiffusion process. A laser diode pumped Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> single crystal fiber extracavity frequency doubled laser at room temperature has been developed for the first time. A CW green laser of 10  $\mu$ W (at 0.532  $\mu$ m) is obtained under 19 mW (at 1.064  $\mu$ m) input power.

**Key words** Nd : MgO : LiNbO<sub>3</sub> single crystal fiber, Mg-ion indiffusion, cladding, laser diode pumping, frequency doubled laser, Nd : YVO<sub>4</sub> crystal

\*\*\*\*\*

## 自锁模掺铬氟化锂锶铝激光器产生小于 50 fs 的超短光脉冲

掺铬氟化锂锶铝激光晶体是一种新型的近红外宽带可调谐激光晶体,它的调谐范围是 750~1000 nm,这种可调谐激光可广泛地应用在激光光谱学领域。

我们用氩离子激光器的 488 nm 谱线来泵浦掺铬氟化锂锶铝晶体,实现了自锁模运转。晶体采用  $\phi 6 \times 20$  mm 的棒,掺杂浓度为 1.7%,棒的两端切成布儒斯特角,泵浦光束经焦距为 10 cm 的透镜聚焦到晶体上,在腔内放置微量 Neocyanine 染料作为启动自锁模的介质。在吸收泵浦功率为 1.8 W 时,实现了自锁模运转。输出光脉冲宽度小于 50 fs,输出功率大于 15 mW,中心波长为 830 nm。

对英国帝国理工学院 J. R. Taylor 博士提供的染料表示感谢。

此项工作得到中国科学院院长基金和留学基金的资助。

(中国科学院西安光机所 阮双琛 王水才 侯 洵 陈国夫  
唐建明 丰 善 刘国荣 收稿日期: 1995 年 5 月 29 日)