

# LD 端面抽运 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 质子交换 波导激光器\*

祁 芳\*\*<sup>1</sup> 胡鸿璋<sup>1</sup> 薛 挺<sup>1</sup> 耿 凡<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 天津大学理学院 教育部光电信息技术科学开放实验室 天津 300072  
<sup>2</sup> 国家航天工业总公司 8358 所 天津 300192

**提要** 报道了 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 波导激光器的研制。在掺有 Nd 和 MgO 的  $x$  切 LiNbO<sub>3</sub> 晶片上利用退火质子交换法制作单模光波导,用波长为 0.814  $\mu\text{m}$  的半导体激光器作为抽运源,以波导两端面本身作为反射镜,研制成了波导激光器,获得波长为 1.084  $\mu\text{m}$  的激光输出,其阈值功率为 3.5 mW,斜率效率为 16%,最大输出功率为 1.2 mW。

**关键词** 集成光学,端面抽运,波导激光器

## 1 引 言

从 60 年代起,有关掺钕、铒等稀土元素的固体激光器的研究就已拉开帷幕。与体器件相比,波导激光器利用光波导结构把光能量约束在截面非常小的波导内,能够有效地提高光功率密度,从而降低激光器的阈值功率、提高斜率效率;另外它还具有结构紧凑、稳定性高等优点。因此,在 Nd·LiNbO<sub>3</sub> 固体激光器问世的同时,人们就已经开始研制 Nd·LiNbO<sub>3</sub> 波导激光器<sup>[1]</sup>。1975 年, Kaminow 和 Stulz<sup>[2]</sup> 研制成功 Nd·LiNbO<sub>3</sub> 平板波导激光器,但是各项性能指标均不理想。E. Lallier 等<sup>[3,4]</sup> 分别于 1989 年和 1990 年采用质子交换法研制成功波导激光器;1992 年 R. Brinkmann<sup>[5]</sup> 等研制成功 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 钛扩散波导激光器; Martin Hempstead 等<sup>[6]</sup> 也采用钛扩散工艺制作成功 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 波导激光器。近年来,国际上有关波导激光器的研究更加活跃,而且自锁模、自调 Q 和可调谐的波导激光器已相继问世<sup>[7]</sup>。这些波导激光器大都采用染料激光器和钛宝石激光器进行抽运,它们的体积都比较大,不利于器件的集成化;另一方面,半导体激光器(LD)具有体积小、稳定性高、寿命长等优点,有利于器件的集成化。我们在实验中采用半导体激光器作为抽运源。

## 2 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 波导激光器的制作

本文使用的是  $x$  切 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 晶体(由华北光电所提供),掺 Nd<sup>3+</sup> 量为 0.22 at-%

\* 国家自然科学基金项目(No. 19674039),并得到集成光电子学国家重点实验室的部分资助。

\*\* 现通信地址:华为技术有限公司传输业务部,深圳 518057。

收稿日期:1999-03-29;收到修改稿日期:1999-05-17

( $C_{Nd} = 1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), 掺 MgO 为 3.0 mol-%。晶体中掺杂的  $\text{Nd}^{3+}$  浓度必须均匀, 否则会削弱激光的荧光谱线强度, 降低  $\text{Nd}^{3+}$  的激活特性, 从而影响激光器的输出功率。样品尺寸为  $12 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

制作光波导的方法主要有质子交换法和钛扩散法, 本实验采用退火质子交换法来制作光波导。样品经过甩胶、光刻、溅射、剥离后留出几组宽度分别为  $6 \mu\text{m}$ ,  $7 \mu\text{m}$  和  $8 \mu\text{m}$  的质子交换区, 采用己二酸作为质子交换源, 交换温度为  $210^\circ\text{C}$ , 交换时间为 40 min。然后, 样品在流动氧气的条件下退火 3 h, 退火温度为  $350^\circ\text{C}$ 。样品端面需进行研磨、抛光, 抛光后样品长度为 12 mm。抛光后的样品端面在高倍显微镜下仍然能够观察到沙滩状凹凸不平的形状, 因此进一步采用高压电弧放电使其平滑, 激光器的 Fabry-Parot 谐振腔由样品的两抛光端面构成。对光波导进行通光测试来观察光波导中的模场分布。将  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  发出的  $1.064 \mu\text{m}$  激光经显微物镜会聚到单模光纤后耦入光波导, 从光波导出射的光波用另一个显微物镜成像到 CCD 摄像仪, 后者又与计算机相连。图 1 (a) 和 (b) 分别表示由 CCD 摄像仪测量得到的在横向和深度方向的模场分布, 它们可以分别用对称高斯分布和非对称高斯分布描述。另外, 我们采用自己研制的“理想耦合法波导损耗测量仪”测得质子交换波导的损耗为  $0.6 \text{ dB/cm}$ 。这些测量表明, 利用退火质子交换制成的光波导的质量比较好。

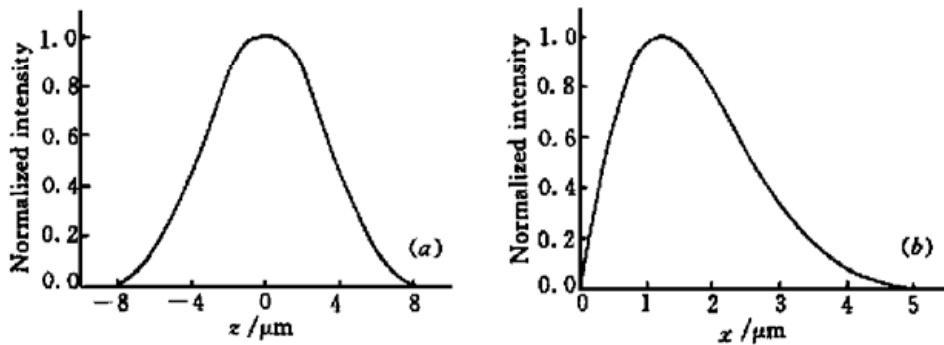


图 1 通过测量得到的激光模场强度分布

(a) 宽度方向; (b) 深度方向。二者均通过模场分布的峰值点

Fig. 1 Measured mode intensity profiles

(a) lateral direction; (b) depth direction. Both through the maximum of the intensity distribution

### 3 实验测试

使用的半导体激光器由中国科学院半导体研究所提供, 它发射的抽运光是一种良好的偏振光, 其偏振方向平行于发光面长度方向, 针对半导体激光器的光束发射角在垂直于结平面和平行于结平面两个方向上差别比较大的情况(平行于结平面内半极大值全发射角为  $6.5^\circ$ , 垂直于结平面内为  $30^\circ$ ), 采用光纤柱面镜和球面镜结合的耦合系统来提高耦合效率。

为了使半导体激光器的输出波长与  $\text{Nd}^{3+}$  的吸收峰相吻合, 通过调节半导体激光器的温度来改变发射波长, 测量了  $\text{Nd} \cdot \text{LiNbO}_3$  晶体对抽运光的透过率与波长的关系曲线<sup>[8]</sup>, 图 2 给出了  $\sigma$  偏振( $\vec{E} \perp \vec{c}$ ) 和  $\pi$  偏振( $\vec{E} \parallel \vec{c}$ ) 的透过率随半导体激光器温度的变化曲线, 它们的吸收峰所对应的温度分别为  $17^\circ\text{C}$  和  $38^\circ\text{C}$ 。退火质子交换法制作的光波导中非寻常光折射率增加, 而寻常光折射率减小, 因此从光波导出射的光是单一的偏振光, 即电场矢量平行于光轴 ( $\pi$  偏振) 的偏振光。实验中发现有波导和无波导的  $\text{Nd} \cdot \text{LiNbO}_3$  晶体对抽运光  $\pi$  分量的透过率曲线一

致, 这表明在晶体中制作质子交换光波导并没有影响 Nd<sup>3+</sup> 离子的光谱特性。

激光器的性能指标主要有: 阈值功率、斜率效率和最大输出激光功率, 为了对它们进行测试, 设计了如图 3 的实验装置图。半导体激光器发出的 0.814 μm 激光经耦合系统耦入光波导中, 输出的 1.084 μm 受激辐射光用单模光纤耦出再经 10 倍物镜聚焦后用 PIN 来探测, 并在 10 倍物镜后用两片对抽运光 (λ = 0.814 μm) 的反射率为 99.3% 的干涉滤光片滤去抽运光。

根据前面测得 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 晶体对抽运光的透过率曲线, 把半导体激光器的温度控制在 38℃, 使半导体激光器的发射光谱的中心波长与样品的吸收峰重合。在宽度为 6~ 8 μm 的波导中都观察到激光现象, 其中输出激光功率最大的是 8 μm 宽的光波导, 最大输出激光功率为 1.2 mW (光波导每端输出各为 0.6 mW)。为了测量波导激光器的阈值功率和斜率效率, 不仅要测出当 LD 的

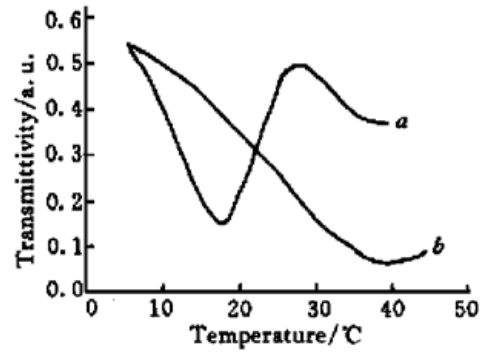


图 2 Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> 晶体对抽运光的透过率与半导体激光器温度的关系

Fig. 2 Transmissivity of Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> crystal versus the temperature of LD  
a:  $\vec{E} \perp \vec{c}$ ; b:  $\vec{E} // \vec{c}$

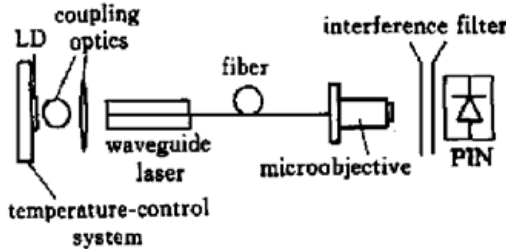


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

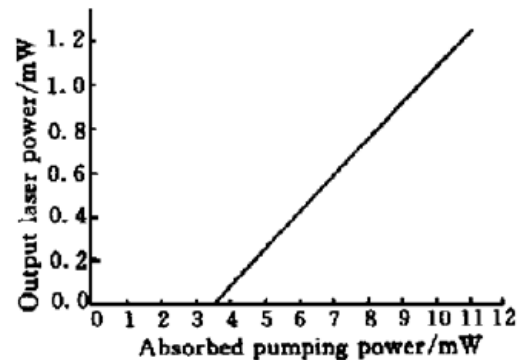


图 4 输出激光功率与被吸收抽运光功率的关系

Fig. 4 Output laser power versus the absorbed pumping power

注入电流取不同值时输出的激光功率, 还要测出被吸收的抽运光的功率。为此, 移去对抽运光高反的干涉滤光镜, 用 GG-1 型激光功率计测量从波导输出端射出的残存的抽运光功率  $P_r$ , 然后依据下式估算出被吸收的抽运光的功率  $P_a$ 。

$$P_a = \frac{P_r}{1 - R} \exp(\alpha L) [\exp(\alpha_a L) - 1]$$

式中  $R = 14\%$ , 为样品端面对抽运光的反射率,  $\alpha_a = 1.75 \text{ cm}^{-1}$  为对  $\pi$  偏振光的吸收系数<sup>[5]</sup>,  $\alpha = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ , 为光波导对抽运光的散射损耗<sup>[5]</sup>,  $L = 1.2 \text{ cm}$ , 为波导长度。图 4 给出了输出激光功率与被吸收的抽运光功率之间的拟合直线关系。从图上可以看出, 阈值功率为 3.5 mW, 斜率效率为 16%。实验过程中没有观察到任何光折变损伤现象, 激光输出非常稳定。

### 参 考 文 献

1 N. F. Evlanova, A. S. Kovalev, V. A. Koptsik *et al.*. Stimulated emission of LiNbO<sub>3</sub> crystals with neodymium impurity. *JETP Lett.*, 1967, 5(2): 291~ 294

- 2 I. P. Kaminow, I. W. Stulz. Nd·LiNbO<sub>3</sub> laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **QE-11**(6): 306~308
- 3 E. Lallier, J. P. Pocholle, M. Papuchon *et al.*. Laser oscillation of single-mode channel waveguide in Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub>. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(22): 1491~ 1492
- 4 E. Lallier, J. P. Pocholle, M. Papuchon *et al.*. Efficient Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> waveguide laser. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(13): 927~ 928
- 5 R. Brinkmann, W. Sohler, H. Suche *et al.*. Fluorescence and laser operation in single-mode Ti·diffused Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> waveguide structures. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(2): 466~ 470
- 6 Martin Hempstead, James S. Wilkinson, Laurence Reekie. Waveguide lasers operating at 1084 nm in neodymium-diffused lithium niobate. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8): 852~ 855
- 7 E. Lallier, J. P. Pocholle, M. Papuchon *et al.*. Integrated Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> FM mode-locked waveguide laser. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(11): 936~ 937
- 8 Qi Fang, Yi Xiaoguang, Xue Ting *et al.*. A simple scanning spectroscopic technique to make the central wavelength of laser diode match with active medium. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1998, **27**(9): 824~ 827 (in Chinese)

## Development of Annealed Proton Exchanged Waveguide Laser in Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub> Pumped by LD

Qi Fang Hu Hongzhang Xue Ting

(*Optoelectronic Information Science and Technology Lab. MOE, College of Natural Sciences, Tianjin University, Tianjin 300072*)

Geng Fan

(*National Space Flight Industry Office, 8358 Institute, Tianjin 300192*)

**Abstract** In this work, an annealed proton-exchanged waveguide laser is designed and fabricated in  $x$ -cut Nd·MgO·LiNbO<sub>3</sub>. This waveguide laser is pumped by a laser diode at 814 nm with a coupling optics composed by a cylindrical lens and a microobjective. The optical feedback is provided by the polished endfaces alone. The threshold of the absorbed pumping power is estimated of 3.5 mW, and its slope efficiency in terms of total lasing as a function of absorbed pumping power is 16%. With the available pump power the laser can emit up to 1.2 mW without any photorefractive damage.

**Key words** integrated optics, end pump, waveguide laser