

# 棱边倒角面抽运热键合平板波导固体激光器

张海涛 康宏向 王东生 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系激光与光子技术研究室, 北京 100084)

**摘要** 采用晶体热键合方法加工制作了 YAG/Nd:YAG/YAG 单包层平板波导, 波导晶体几何尺寸为  $12\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , 其中中心掺杂层 Nd:YAG 厚度约为  $0.2\text{ mm}$ , 对称外包层 YAG 厚度约为  $0.4\text{ mm}$ 。采用一种新的抽运方法——棱边倒角面抽运方法对晶体进行抽运: 波导晶体的一条  $12\text{ mm}$  长棱边加工成大小为  $12\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$  的倒角面, 快轴准直抽运激光二极管(LD)发出的抽运光经聚焦后从倒角面入射进入晶体, 抽运吸收效率约为  $82\%$ 。激光器谐振腔采用平-平腔, 其中全反镜直接在波导晶体端面镀高反膜实现, 输出镜尽可能靠近晶体另一端面, 腔长约  $12\text{ mm}$ 。当输出镜透射率为  $6.6\%$ , 激光二极管抽运光功率约为  $49.5\text{ W}$  时, 得到输出激光功率  $13.6\text{ W}$ , 光-光转换效率约  $27.5\%$ , 导波方向光束质量  $M^2$  因子  $1.9$ 。激光器实现了较高的光-光转换效率和较好的导波方向光束质量。

**关键词** 激光技术; 固体激光器; 棱边倒角面抽运; 平板波导固体激光器; 热键合

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## An Edge-Bevel-Pumped Thermally Bonded Planar Waveguide Solid-State Laser

Zhang Haitao Kang Hongxiang Wang Dongsheng Gong Mali

(Laboratory of Laser and Photonics Technology, Department of Precision Instrument and Mechanism, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** By thermal bonding technology the single-clad YAG/Nd:YAG/YAG planar waveguide crystal has been fabricated. The geometry of the waveguide crystal is  $12\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , and Nd:YAG core is  $0.2\text{ mm}$  thick and symmetry claddings are  $0.4\text{ mm}$  thick. A novel pump scheme is employed——edge-bevel pumping: A  $12\text{ mm}$  long edge is chamfered as a  $0.3\text{ mm}$  wide bevel, the pump light from the fast-axis-collimated laser diode (LD) is focused and coupled into the crystal through the edge bevel. The pump efficiency is  $82\%$ , when the transmittance of the output mirror is  $6.6\%$  and the diode pump power is  $49.5\text{ W}$ , the output power is  $13.6\text{ W}$  with flat-flat cavity, the optical-optical conversion efficiency is  $27.5\%$ , and the transverse  $M^2$  factor is  $1.9$ . The laser achieves a relatively high optical-optical conversion efficiency and excellent beam quality in transverse direction.

**Key words** laser technique; solid-state laser; edge-bevel pump; planar waveguide solid-state laser; thermal bonding

### 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有体积小、效率高、光束质量好等优点, 是当前固体激光器研究的主流方向<sup>[1,2]</sup>, 而将高发散、非对称、非衍射极限的抽运光耦合到激光介质中, 获得紧凑、高效、高光束质量的激光源又是其中研究的热点领域。平板波导激光器具有以下几个独特的优点: 1) 平板结构与条形激光二极管具有良好的几何匹配, 不需要复杂的光束整形; 2) 波导结构具有大的数值孔径, 可

以很好地约束非衍射极限的抽运光; 3) 平板波导结构可以从上下两个表面大面积散热, 散热效果好, 其一维的热梯度有利于对热效应进行控制; 4) 波导效应可以对激光的导波方向进行模式控制, 实现导波方向的近衍射极限输出; 5) 波导将抽运光局限在一个很小的空间内, 即使在较低的抽运功率下也可以实现高增益; 6) 板条介质厚度越薄, 可以承受的热功率密度越大, 平板波导晶体的薄层结构极大地提高了晶体的抗破坏功率密度, 可以承受高功率密度抽

**作者简介:** 张海涛, 女, 博士, 副研究员, 主要从事平板波导固体激光技术、无线光通信技术等方面的研究。

E-mail: zhanghaitao@mail.tsinghua.edu.cn

运,实现微型、高功率的全固态激光器。因而,平板波导固体激光器正成为当前固体激光器技术领域的重要发展方向,具有广泛的应用前景<sup>[3~5]</sup>。

本文开展了平板波导激光晶体的制备、平板波导固体激光器的抽运方法和工作特性等方面的研究。

## 2 平板波导激光晶体的制备

平板波导激光晶体是激光器的核心器件,也是平板波导固体激光器技术中最关键的环节。平板波导的制作方法主要有离子注入(Ion-implanted)<sup>[6]</sup>、离子交换(Ion-exchange)<sup>[7]</sup>、水解沉积离子刻蚀(Flame hydrolysis deposition and reactive ion etching)<sup>[8]</sup>、液相外延生长(Liquid phase epitaxial growth)<sup>[9]</sup>、热键合<sup>[10]</sup>等。与其他几种方法比较,热键合方法不需要专业的晶体生长设备,可以充分利用成熟的光学精抛工艺、成本低,而且其键合对象可以是不同材质,可以实现异种材料的键合,因此,具有较大的优越性,目前性能最好的平板波导激光器基本都采用热键合方法制作。

热键合技术通过范德瓦耳斯力将两片晶体结合到一起,包含四个步骤:1)对晶体的表面进行精细抛光,保证键合所需的平面度,使两表面分子间距足够小,从而产生足够大的分子间引力;2)对晶体表面进行清洗,清除吸附在表面的微小颗粒等杂质;3)将两晶体表面光胶,使两晶体通过范德瓦耳斯力吸合在一起;4)对光胶后的晶体进行热处理,清除残留在晶体界面间的空气和 H—O 基,使分子间距更小、键合力更强。研究得出结论,热键合的晶体具有足够的键合强度,能满足切割、抛光等传统的加工工艺要求,波导光损耗小于 1 dB/cm。

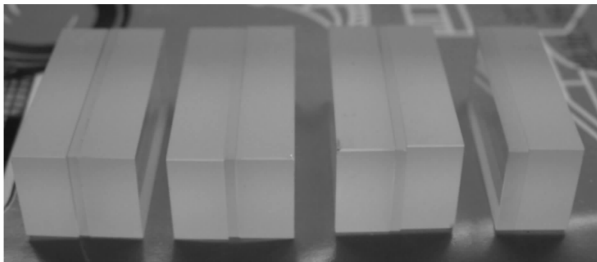


图 1 热键合方法制备的平板波导晶体样品

Fig. 1 Samples of thermal bonded planar waveguide crystals

采用热键合方法制备了单包层 YAG/Nd:YAG/YAG 平板波导激光晶体,样品如图 1 所示,晶体界面键合完好,无气泡、白雾等瑕疵,采用这些晶体的平板波导激光器实验中得到了高的光光转换效

率,说明所制作的平板波导晶体具有较低的传输损耗,其性能完全能满足应用要求。加工制作完成的平板波导激光晶体结构及其折射率分布如图 2 所示。

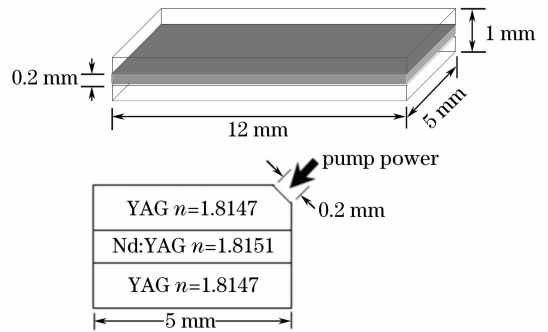


图 2 平板波导晶体结构及其折射率分布

Fig. 2 Dimensions and refractivity distributing of the planar waveguide crystal

## 3 棱边倒角面抽运方法

平板波导固体激光器抽运方式主要有端面抽运、侧面抽运和表面抽运。端面抽运的优点是抽运光与振荡激光重叠度高,通过控制抽运光在非导波方向的分布,可以有效控制激光在非导波方向的模式;缺点是受热透镜效应影响大,抽运功率受限,功率可扩展性较差。侧面抽运可以采用紧耦合抽运方法,功率可扩展性好,但抽运效率相对较低,而且抽运光在晶体内抽运面附近最强,导致晶体边缘部分吸收抽运能量最多并且热效应影响最大,不利于激光振荡对抽运能量的提取。表面抽运的优点是抽运表面面积大,功率可扩展性强;缺点是抽运光一次通过波导晶体吸收光程太短效率太低,为了提高抽运效率必须采用可使抽运光反射多次经过晶体的抽运腔,抽运和水冷结构都非常复杂。

鉴于现有抽运方法各具有优缺点,不能很好地满足平板波导激光器的抽运需要,我们采用一种新的抽运耦合方案——棱边倒角面抽运。如图 2 所示,在平行于激光振荡方向的一条棱边上倒角得到一个宽约为 0.2 mm 的倒角面,抽运光通过倒角面进入晶体内部。棱边倒角面抽运具有如下优点:1)利用晶体表面全反射使抽运光多次经历掺杂晶体,晶体对抽运光的吸收效率高;2)抽运光不经过晶体的镀膜端面,在大大提高晶体的抽运损伤阈值的同时减少热透镜效应对激光器工作的影响;3)可以紧耦合直接抽运,抽运结构简单;4)功率的可扩展性强,增加倒角棱边的数量或增长波导的长度就可以增加抽运激光二极管的数量,从而提高抽运功率;

5)抽运调节简单,当激光二极管的位置过高或过低时,抽运光会经由波导晶体侧面向上反射或经由波导晶体下表面向下反射,可以很方便地观察抽运耦合是否良好。对于图 2 所示  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂原子数分数 1% 的平板波导晶体,经光线追迹仿真计算,激光二极管发出的抽运光经聚焦后通过棱边倒角面对晶体进行抽运,晶体对抽运光的吸收效率约 82%。棱边倒角面抽运的缺点是晶体吸收的抽运能量沿平板方向分布范围较大,谐振腔的模尺寸在平行于平板方向必须足够大才能实现对所吸收的抽运能量进行高效提取。

## 4 实验结果

图 3 为实验装置示意图。激光晶体为图 2 所示结构的 Nd 掺杂原子数分数 1% 的平板波导晶体,晶体一端镀 1064 nm 增透膜,另一端镀 1064 nm 高反膜作为谐振腔的全反镜,激光输出镜为透射率 6.6% 的平面镜,为了减少激光在晶体端面和输出镜之间的传输损耗,输出镜尽可能靠近波导端面,腔长约 12 mm。抽运光源为 Dilas 公司生产的 50 W 准直连续输出激光二极管,光斑大小为  $10 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ ,对应的发散角为  $8 \text{ mrad} \times 140 \text{ mrad}$ ,光束经快慢轴两个方向的柱透镜聚焦后从棱边倒角面进入晶体。当抽运功率 49.5 W 时得到最大激光器输出功率 13.6 W,实验输出曲线如图 4 所示,斜率效率约为 30%,光-光转换效率 27.5%。观察激光输出,其近场光斑近似圆角矩形,远场强度分布如图 5 所示,用光束质量分析仪测得导波方向的光束质量  $M^2 = 1.9$ 。

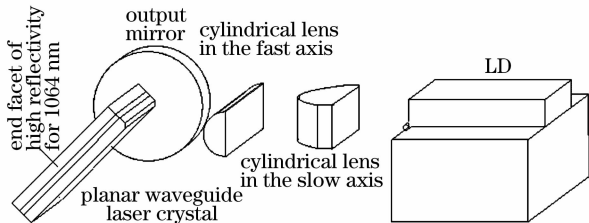


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup

## 5 结论

用热键合方法制备了 YAG/Nd:YAG/YAG 单包层波导,采用棱边倒角面抽运方法对平板波导晶体进行抽运,得到最大激光输出功率 13.6 W,光-光转换效率 27.5%,导波方向光束质量  $M^2$  因子为 1.9,在较短的腔长和不加入其他选模器件的情况下,得到了导波方向较好的光束质量输出。本文得

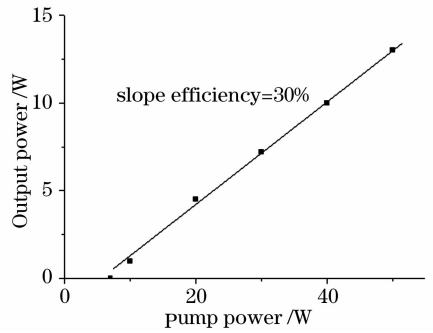


图 4 激光器输入输出曲线

Fig. 4 Output power versus pump power

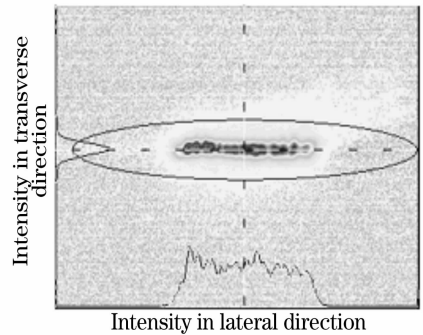


图 5 远场光斑强度分布

Fig. 5 Far-field intensity pattern

到的光-光转换效率与块状晶体激光器相比较低,但与文献报道的其他抽运方式的平板波导固体激光器相比略高,说明棱边倒角面抽运方法可以实现对平板波导晶体的高效抽运。对晶体的散热方式是将晶体固定在水冷热沉底座上,热量主要从下表面流走,晶体的散热不对称,可能在一定程度上影响了激光输出功率,通过改善晶体热沉,实现对晶体的对称散热,并对实验的其他环节进行优化,预期可以进一步提高激光的输出功率。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363  
孙尧,李涛,于果蕾等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO<sub>4</sub> 晶体热效应分析及倍频研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 359~363
- 2 Li Jie, Chen Haiqing, Yu Hongbin. Study of deformable mirror for compensating the thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1198~1202  
李捷,陈海清,余洪斌. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的微变形镜特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1198~1202
- 3 D. P. Shepherd, S. J. Hettriok, C. Li *et al.*. High-power planar dielectric waveguide lasers[J]. *Appl. Phys.*, 2001, **34**: 2420~2432

- 4 R. J. Beach, S. C. Mitchell, H. Z. Meissner *et al.*. CW and passively Q-switched cladding-pumped planar waveguide lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**: 236~242
- 5 J. Wang, J. I. Mackenzie, D. P. Shepherd. A diode-stack side-pumped waveguide laser[C]. *CLEO*, 2005. 1694~1696
- 6 P. J. Chandler. Ion-implanted Nd:YAG planar waveguide laser [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(15): 985~986
- 7 E. K. Mwarania, L. Reekie, J. Wang *et al.*. Low-threshold monomode ion-exchanged waveguide lasers in neodymium-doped BK-7 glass[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(16): 1317~1318
- 8 Kuninori Hattori, Takeshi Kitagawa, Yasuji Ohmori *et al.*. Laser-diode pumping of waveguide laser based on Nd-doped silica planar lightwave circuit [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**: 882~884
- 9 D. Plenec, B. Chambaz, I. Chartier *et al.*. High slop efficiency and low threshold in a diode-pumped epitaxially grown Yb:YAG waveguide laser[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**: 491~497
- 10 C. T. A. Brown, C. L. Bonner, T. J. Warburton *et al.*. Thermally bonded planar waveguide lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(9): 1139~1141