

半导体激光器端面抽运高功率高效 Nd·YVO₄ 固体激光器*

刘均海 卢建仁 吕军华 邵宗书 蒋民华
(山东大学晶体材料国家重点实验室 济南 250100)

提要 报道了一种光纤耦合半导体激光器端面抽运高功率高效 Nd·YVO₄ 固体激光器。在抽运功率为 20 W 时获得了 11 W 的 TEM₀₀ 模输出, 光-光转换效率为 55%; 而抽运功率为 12 W 时输出功率为 7.1 W, 光-光转换效率为 59%, 斜效率达 64%。在高抽运功率下测量了 Nd·YVO₄ 晶体的热透镜焦距, 结果表明: 得到有效冷却的低浓度和高质量的 Nd·YVO₄ 晶体, 其热聚焦作用实际上相对很弱。

关键词 端面抽运, 高功率固体激光器, 热聚焦, 热焦距

连续输出功率在 5~10 W 范围 1.06 μm 的 Nd³⁺ 固体激光器在诸如材料加工、远距离通信、光存储、图像记录及遥感等领域有着重要应用^[1]。因此, 人们在努力提高转换效率的同时, 也在不断致力于提高其输出功率水平^[2,3]。目前, LD 单端抽运 Nd·YAG 连续激光器的输出功率已超过 5 W, 转换效率超过 40%, 斜效率已达 50%^[1,4-6]。与 YAG 相比, 另一种 Nd³⁺ 基质晶体 YVO₄ 热导率虽然比 YAG 低, 机械性能也不如 YAG, 但因 Nd·YVO₄ 对 808 nm 抽运光的吸收系数大; 吸收系数对抽运光波长的细微变化不灵敏以及可直接产生偏振光振荡及输出等特点, 在 5~10 W 的功率范围内作为 LD 端面抽运增益介质而颇具吸引力^[1]。

提高 LD 端面抽运固体激光器输出功率所遇到的最大障碍在于激光晶体因吸收抽运光而伴随产生的热效应, 它包括两个方面: 热透镜及伴随热透镜的高阶球差^[7]。随抽运功率变化的热焦距使腔内模参数发生变化, 也可能使腔的稳定范围变窄, 但这些可通过适当的腔设计加以克服。伴随热透镜的球差会使腔内衍射损耗加剧, 导致转换效率下降^[4,5,8]。我们的实验研究表明: 只要选用 Nd³⁺ 浓度低、均匀性好、光学质量高的 Nd·YVO₄ 晶体, 对其进行有效冷却以减少晶体内的热积累, 加上合理的腔设计, 可以实现高功率高效的 TEM₀₀ 模输出。

1 Nd·YVO₄ 晶体热焦距 f_T 的测量与分析

在 LD 端面抽运固体激光器情况下, 激光晶体中的热聚焦作用在一级近似下可等效为一个理想的薄透镜^[9], 其焦距 f_T 随抽运功率 P_{in} 变化。由于腔的稳定性及腔内各处的模参数均与

* 国家 863 高技术发展计划重大资助项目。

收稿日期: 1998-08-25; 收到修改稿日期: 1998-10-23

热焦距 f_T 有关, 因此获得不同抽运功率下的热焦距数据对于激光器的设计和优化极为重要。

本实验所用 Nd·YVO₄ 晶体的浓度 $\approx 0.5\%$, 尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 晶体的一个端面镀 808 nm 和 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的双波长增透膜, 另一端面镀 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的增透膜。晶体侧面用铝箔包裹(以达到良好的热接触)置入铜块内, 外面用半导体制冷器冷却并可控温。

我们在抽运功率 P_{in} 为 $8\sim 12\text{ W}$ 范围内测量了 Nd·YVO₄ 晶体热焦距 f_T 随抽运功率 P_{in} 的变化, 结果示于图 1。图 1 表示 $1/f_T$ 随 P_{abs} 的变化关系, $1/f_T$ 为热焦距倒数, 可称之为热光焦度(thermal focal power)。 P_{abs} 为晶体所吸收的总的抽运功率, 对通过晶体后剩余抽运光功率的测量表明: $P_{abs} \approx 0.9P_{in}$ 。图 1 中实线为对所测数据进行最小二乘线性拟和所得结果, $1/f_T$ 随 P_{abs} 的变化为近乎完全的线性关系, 这与 Innocenzi 的理论预期结果相一致^[9]。由拟和结果

还可得出 $1/f_T$ 随 P_{abs} 变化的微分系数 $\frac{d(1/f_T)}{dP_{abs}} =$

$(0.256 \pm 0.003)\text{ m}^{-1}\text{W}^{-1}$, 表明本实验中所用的 Nd·YVO₄ 晶体, 其中的热聚焦作用相对很弱。这一结果

意味着所测的 Nd·YVO₄ 晶体均匀性极好, 由掺杂引起的内部晶格畸变轻微, 因而其热导率相对较高, 同时也证明对晶体进行的冷却是很有效的。

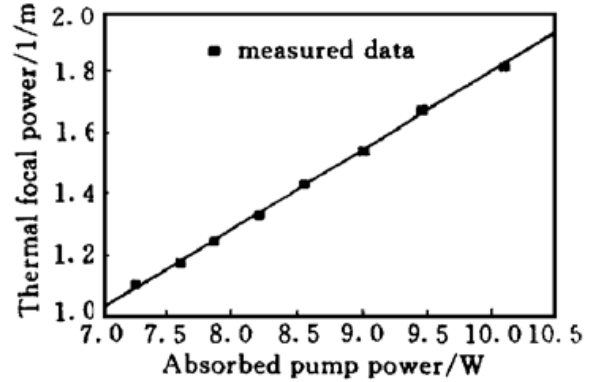


图 1 热光焦度 $1/f_T$ 随晶体中吸收的抽运功率 P_{abs} 的变化

Fig. 1 Thermal focal power $1/f_T$ as a function of absorbed pump power in the crystal P_{abs}

2 实验结果及讨论

实验装置如图 2 所示。 M_1 为平面镜, 一面对 808 nm 增透; 另一面对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 全反, 同时对 808 nm 高透。 M_2 为对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 部分透过的输出耦合镜。 M_3 为曲率半径为 200 mm 的平凹镜, 凹面镀 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的全反膜, 用作折叠镜。本实验所用抽运源为光纤束耦合输出的高功率半导体激光器 OPC-D030-FCHS(Opto-Power Corp.), 光纤束直径为 1.55 mm , 数值孔径 $N.A. = 0.11$, 最大输出功率为 30 W 。经聚焦系统后抽运光斑半径 $W_p \approx 0.4\text{ mm}$, $N.A. \approx 0.22$ 。所用的激光晶体为 1 中测量热焦距时的 Nd·YVO₄, 实验过程中其温度控制在 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 。

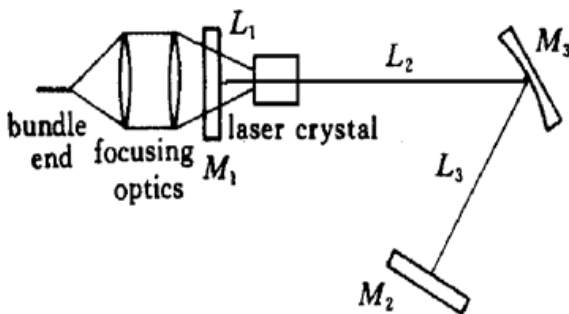


图 2 激光器实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

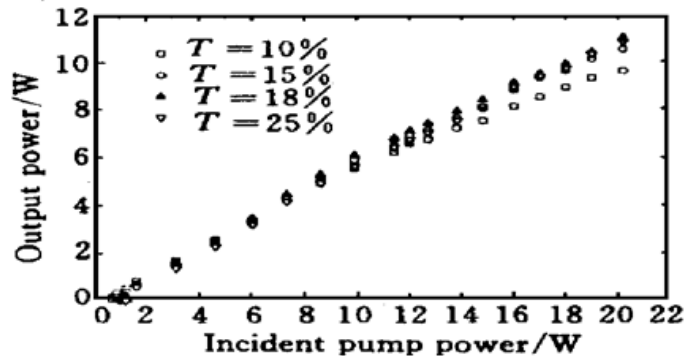


图 3 不同输出透过率情况下输出功率 P_{out} 随抽运功率 P_{in} 的变化关系

Fig. 3 Relations between output power P_{out} and incident pump power P_{in} for various output couplings

利用透过率 T 分别为 10%, 15%, 18% 和 25% 四种不同的输出耦合镜, 在 P_{in} 为 0~20 W 的抽运功率范围内, 测量了不同抽运功率下的 TEM₀₀ 模输出功率。测量过程中没有发现高阶横模振荡。实验结果示于图 3。当输出镜透过率 T 为 10% 时, 阈值抽运功率 $P_{th} \sim 0.4$ W; T 为 25% 时, $P_{th} \sim 1$ W, 低的抽运阈值意味着腔内损耗很小。由图 3 可见, 最佳输出耦合相应于 $T = 18\%$, 在抽运功率 P_{in} 为 20 W 时, TEM₀₀ 模的 P_{out} 为 11 W, 相应的光-光转换效率为 55%; 而在抽运功率 P_{in} 为 12 W 时, TEM₀₀ 模的 P_{out} 为 7.1 W, 光-光转换效率为 59%, 斜效率达 64%。从图 3 还可看出, 抽运功率为 20 W 时, 斜效率已有所下降, 表明此时 Nd:YVO₄ 晶体由热透镜球差引起的附加衍射损耗有所增加, 但 TEM₀₀ 模输出功率 P_{out} 仍未出现饱和的迹象。与此相应, 此时晶体内的热聚焦作用应当相对较弱, 这与 1 中对热焦距 f_T 的测量结果相一致。

参 考 文 献

- 1 W. L. Nighan, Jr., M. Park, M. S. Kehstead *et al.*. Diode pumped laser with strong thermal lens crystals. *US Patent*, 5410559. Apr. 25, 1995
- 2 S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers *et al.*. Scaling CW diode-end-pumped Nd:YAG lasers to high average powers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 997~ 1009
- 3 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6): 895~ 912
- 4 Y. Kaneda, M. Oka, H. Masuda *et al.*. 7.6 W of continuous-wave radiation in a TEM₀₀ mode from a laser-diode end-pumped Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(14): 1003~ 1005
- 5 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Efficient Nd:YAG laser end pumped by a 20-W diode-laser bar. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 869~ 871
- 6 C. Yelland, W. Sibbett. Stable 4 W CW solid-state green source pumped by fibre-coupled diode-laser arrays. *J. Modern Opt.*, 1996, **43**(5): 893~ 901
- 7 J. Frauchiger, P. Albers, H. P. Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd:YAG lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1046~ 1056
- 8 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~ 1429
- 9 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1831~ 1833

High-power High-efficiency Nd:YVO₄ Solid-state Laser End-pumped by a Fiber-coupled Diode Laser Array

Liu Junhai Lu Jianren Lü Junhua Shao Zongshu Jiang Minhua
(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract A high-power high-efficiency Nd:YVO₄ solid-state laser end-pumped by a fiber-coupled diode laser was reported in this paper. 11 W of CW TEM₀₀ mode output was obtained at a pump power of 20 W, giving an optical conversion efficiency of 55%; the output power reached 7.1 W at pump power of 12 W, resulting in an optical conversion efficiency of 59%, and a slope efficiency of 64%. The thermal focal length of the Nd:YVO₄ crystal was measured under various high pump power levels. The results show that thermal lensing within low-concentration Nd³⁺-doped high-quality Nd:YVO₄ crystals is relatively quite weak, provided that the laser crystal is efficiently cooled.

Key words end-pumped, high-power solid-state laser, thermal focusing, thermal focal length