

文章编号: 0258-7025(2003)08-0681-03

LD 抽运高功率连续波 1.34 μm Nd: GdVO₄激光器研究

杜晨林, 秦连杰, 孟宪林, 王正平, 许心光, 邵宗书, 祝莉, 徐炳超

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 报道了利用光纤耦合大功率半导体激光器(LD)抽运 Nd: GdVO₄晶体,采用平凹谐振腔,输出 1.34 μm 波长的高功率连续波固体激光器。在抽运功率为 14.75 W 时,获得最大输出功率为 4.62 W,光-光转换效率为 31.3%,斜率效率达 32.9%。利用实验测得的阈值抽运功率和斜率效率,计算了 Nd: GdVO₄晶体在 1.34 μm 波长处的受激发射截面。

关键词 激光技术; Nd: GdVO₄晶体; 半导体激光器抽运; 受激发射截面

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Study of High-power Continuous-wave 1.34 μm Nd: GdVO₄ Laser End-pumped by Laser-diode array

DU Chen-lin, QIN Lian-jie, MENG Xian-lin, WANG Zheng-ping,

XU Xin-guang, SHAO Zong-shu, ZHU Li, XU Bing-chao

(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract A high-power continuous-wave 1.34 μm Nd: GdVO₄ laser end-pumped by laser-diode array with plano-concave resonator was reported. At the incident pump power of 14.75 W, the maximum output power of 4.62 W was obtained with the corresponding optical conversion efficiency of 31.3% and the average slope efficiency of 32.9%. By using the experimentally measured threshold data and slope efficiency, the stimulated emission cross-section of Nd: GdVO₄ crystal was determined to be $1.95 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$.

Key words laser technique; Nd: GdVO₄ crystal; diode end-pumped; stimulated emission cross-section

半导体激光器(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL)以其高效率、高稳定性、寿命长、体积小、结构紧凑、光束质量好等优点,已经被广泛地应用于医疗、科研、工业、信息和军事等领域。激光晶体的各方面(包括光学、机械、热学等)性能决定着 DPSSL 的效率、寿命、稳定性和光束质量等各方面性能指标。近几年来, Nd: YAG 和 Nd: YVO₄晶体由于其良好的性能,已经成为 DPSSL 中应用最广泛的激光晶体。Nd: YVO₄晶体相对于 Nd: YAG 晶体具有发射截面大、吸收系数高、输出为线偏振等优点,但是它的热导率却远小于 Nd: YAG 晶体的热导率^[1,2],

所以 Nd: YVO₄晶体在高功率激光器中由于热导率低极易破裂^[3],这已成为 Nd: YVO₄晶体应用于高功率 DPSSL 的一个难以克服的障碍。作为一种比较新型的激光晶体, Nd: GdVO₄晶体除了具有 Nd: YVO₄晶体的优点之外,它沿<110>方向的热导率为 $11.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,稍高于 Nd: YAG 晶体的热导率 ($11.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)^[2]。因此, Nd: GdVO₄晶体被认为是一种在全固态激光器领域很有发展前途的激光晶体。

1.3 μm 波长附近的激光由于与光通信中广泛采用的硅光纤传输窗口相吻合,而且它的倍频又是

收稿日期: 2002-04-16; 收到修改稿日期: 2002-06-17

作者简介: 杜晨林(1976—),男,山东大学晶体材料国家重点实验室博士研究生,主要从事全固态激光器和非线性光学研究。E-mail: cldu@icm.sdu.edu.cn

得到红色激光的有效途径,因此具有非常广泛的应用前景。1998年,何京良等^[4]利用激光二极管(LD)抽运Nd:YVO₄晶体,在6.6W的抽运功率下,得到了2.3W的1.34 μm激光输出,光-光转换效率和斜率效率分别为35%和43%。1999年,Y. F. Chen等^[5]利用LD抽运掺杂浓度为0.5 at.-%的Nd:YVO₄晶体获得了5.1W的1.34 μm激光输出,光-光转换效率为37.8%。关于Nd:GdVO₄晶体的研究工作,近几年主要集中在1.06 μm谱线及其倍频0.53 μm上,对于1.34 μm谱线则研究得极少。1999年,我们利用大功率半导体激光器抽运Nd:GdVO₄晶体,获得了14.3W的连续1.06 μm激光输出,光-光转换效率和斜率效率分别为55%和62%^[6],利用KTP晶体腔内倍频得到了3.6W的绿光输出^[7]。掺杂浓度为1.2 at.-%的Nd:GdVO₄晶体在1.34 μm处的受激发射截面为 $1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,大于Nd:YAG晶体的 $0.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,略小于Nd:YVO₄晶体的 $2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,因此Nd:GdVO₄晶体也可以作为产生1.34 μm激光的选择之一^[1,8,11]。本文报道大功率半导体激光器端面抽运Nd:GdVO₄晶体高功率1.34 μm激光器的实验装置和结果。

1 实验装置

实验装置如图1所示。抽运源为光纤耦合输出的大功率半导体激光器,光纤输出口径为1.55 mm,室温下的峰值波长在808 nm附近。从光纤输出的抽运光经过特定的光学聚焦系统,在激光晶体前表面附近被聚焦成半径约为258 μm的抽运光斑。激光器谐振腔采用平凹腔结构,腔长约为40 mm。抽运端腔镜M₁的曲率半径为250 mm,其前表面(平面)镀808 nm增透膜,后表面(凹面)镀808 nm高透膜和1.34 μm高反膜(反射率大于99%)。实验中所用的三片输出镜M₂均为平面镜,对1.34 μm的透过率分别为4.8%,8%和13.1%。为了抑制激光晶体1.06 μm谱线的谐振,输出镜M₂对

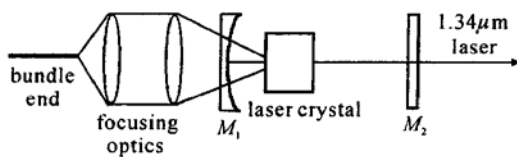


图1 激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental laser setup

1.06 μm的透过率均高于90%。考虑激光晶体的热透镜效应,根据ABCD定律,计算激光晶体处的腔膜半径为180~200 μm。

实验采用山东大学晶体材料研究所生产的Nd:GdVO₄晶体,晶体尺寸为3.5 mm × 3.5 mm × 6 mm,沿a轴方向切割,Nd³⁺浓度为0.52 at.-%,两个通光面均镀808 nm和1.34 μm增透膜(透过率大于99%)。为了去除激光晶体在大功率抽运下产生的大量热量,减小激光晶体的热效应,Nd:GdVO₄晶体侧面用铝箔包裹置于紫铜块内,并用半导体制冷器和循环水冷却,实验时温度控制在20℃左右。

2 实验结果及讨论

测量了在三种不同输出耦合透过率($T = 4.8\%$, 8% 和 13.1%)条件下,激光器的输出功率与抽运功率的关系,如图2所示。从图中可以看出,在整个抽运功率范围内,利用透过率为4.8%的输出镜所得到的1.34 μm激光输出功率和斜率效率均高于其他两个输出镜,而且阈值抽运功率最低,为0.782 W。在抽运功率为14.75 W时,获得最大连续激光输出功率为4.62 W,对应的光-光转换效率为31.3%,斜率效率为32.9%。当抽运功率继续往上增加时,激光输出功率开始下降,激光晶体的温度开始持续上升。这是由于在高功率抽运条件下,激光晶体中严重的热透镜效应使谐振腔偏离稳定区范围所致。在透过率为8%和13.1%的输出镜条件下,所获得的最大激光输出功率、相应的光-光转换效率、斜率效率分别为3.92 W, 28.4%, 31.3%和3.39 W, 24.6%, 28.9%。

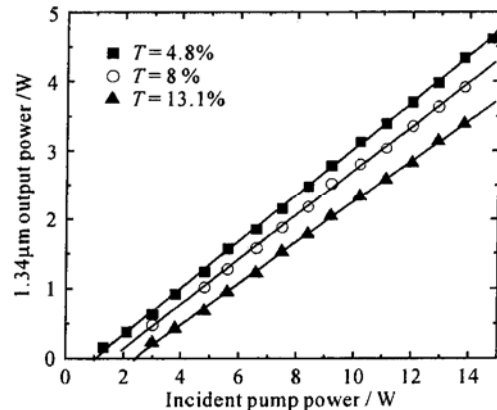


图2 1.34 μm激光输出功率与抽运功率的关系
Fig. 2 1.34 μm output power as a function of pump power for different output couplers

对于 LD 端面抽运的连续固体激光器, 阈值抽运功率 P_{th} 和输出耦合镜的反射率 R 存在如下关系^[9]

$$P_{\text{th}} = P_{\text{th}0} + \frac{P_{\text{th}0}}{\delta} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \quad (1)$$

其中 $P_{\text{th}0}$ 为当 $R = 1$ 时的激光器阈值抽运功率, δ 为谐振腔的腔内往返损耗。因此, 根据实验测得的 P_{th} 与 $\ln(1/R)$ 的线性关系, 通过线性拟合, 就可以计算出 δ 和 $P_{\text{th}0}$ 。图 3 给出了实验结果, 图中的直线为线性拟合的结果。根据线性拟合结果, 计算出 δ 和 $P_{\text{th}0}$ 分别为 0.73% 和 0.102 W。

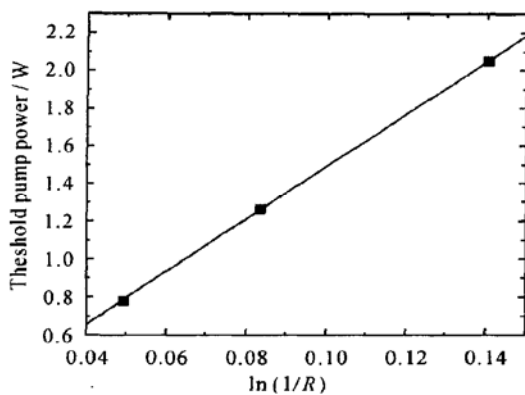


图 3 阈值抽运功率 P_{th} 和 $\ln(1/R)$ 的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between the threshold pump power P_{th} and $\ln(1/R)$

根据 S. A. Payne 等^[10] 的理论计算结果, LD 端面抽运固体激光器的阈值抽运功率和斜率效率 η 还可以表示为

$$P_{\text{th}} = \frac{\pi(w_p^2 + w_c^2)hc(T + \delta)}{4(\sigma_e - \sigma_{\text{ESA}})\tau\lambda_p\eta_p} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \frac{T}{T + \delta} \frac{\sigma_e - \sigma_{\text{ESA}}}{\sigma_e} \eta_p \quad (3)$$

其中, w_p 和 w_c 分别为抽运光和腔模在激光晶体处的半径, h 为普朗克常数, c 为光速, λ_p 和 λ_c 分别为抽运光和激光的波长, T 为输出镜透过率, σ_e 和 σ_{ESA} 分别为受激发射截面和激发态吸收截面, τ 为激光晶体的荧光寿命, η_p 为抽运效率。由(2)和(3)式, 可以得到受激发射截面为

$$\sigma_e = \frac{\pi(w_p^2 + w_c^2)hcT}{4P_{\text{th}}\tau\lambda_c\eta} \quad (4)$$

因此, 根据实验所测得的 P_{th} 和 η , 计算了掺杂浓度为 0.52 at.-% 的 Nd: GdVO₄ 晶体在 1.34 μm 处的受激发射截面 $\sigma_e = 1.95 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 接近于文献报道的掺杂浓度为 1.2 at.-% 的 Nd: GdVO₄ 晶体受激

发射截面^[11]。计算中所用的 τ 值为 109.8 μs ^[12]。

3 结 论

利用大功率光纤耦合输出半导体激光器单端面抽运掺杂浓度为 0.52 at.-% 的 Nd: GdVO₄ 晶体, 采用平凹谐振腔, 最高获得了 4.62W 的连续 1.34 μm 激光输出, 光-光转换效率为 31.3%, 斜率效率为 32.9%。因此, Nd: GdVO₄ 晶体不失为产生高功率 1.34 μm 激光的选择之一。

参 考 文 献

- H. Zhang, X. Meng, J. Liu *et al.*. Growth of lowly Nd doped GdVO₄ single crystal and its laser properties [J]. *J. Cryst. Growth*, 2000, **216**(1~4): 367~371
- P. A. Studenikin, A. I. Zagumennyi, Yu D. Zavartsev *et al.*. GdVO₄ as a new medium for solid-state lasers: some optical and thermal properties of crystals doped with Nd³⁺, Tm³⁺, and Er³⁺ ions [J]. *Quantum Electron.*, 1995, **25**(12): 1162~1165
- Y.-F. Chen. Design criteria for concentration optimization in scaling diode end-pumped lasers to high powers: influence of thermal fracture [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(2): 234~239
- He Jingliang, Zhang Hengli, Hou Wei *et al.*. Generation of cw radiation of 273 mW at 671 nm from a diode-end-pumped intracavity-doubled Nd: YVO₄ laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(5): 343~344
- Y. F. Chen, L. J. Lee, T. M. Huang *et al.*. Study of high-power diode-end-pumped Nd: YVO₄ laser at 1.34 μm : influence of Auger upconversion [J]. *Opt. Comm.*, 1999, **163**: 198~202
- J. Liu, Z. Shao, H. Zhang *et al.*. Diode-laser array end-pumped 14.3-W CW Nd: GdVO₄ solid-state laser at 1.06 μm [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(3): 241~243
- J. Liu, Z. Shao, H. Zhang *et al.*. Diode-laser array end-pumped intracavity frequency-doubled 3.6 W CW Nd: GdVO₄/KTP green laser [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **173**: 311~314
- A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. 430-mW single-transverse mode diode-pumped Nd: YVO₄ laser at 671 nm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7): 1297~1300
- J. Liu, C. Wang, Sh. Zhang *et al.*. Investigation on intracavity second-harmonic generation at 1.06 μm in YCa₄O(BO₃)₃ by using an end-pumped Nd: YVO₄ laser [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **182**: 187~191
- S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk *et al.*. LiCaAlF₆: Cr³⁺: a promising new solid-state laser material [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(11): 2243~2252
- T. Jensen, V. G. Ostroumov, J. P. Meyn *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser-pumped Nd: GdVO₄ [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 373~379
- H. D. Jiang, H. J. Zhang, J. Y. Wang *et al.*. Optical and laser properties of Nd: GdVO₄ crystal [J]. *Opt. Comm.*, 2001, **198**: 447~452