

20.6 W 激光二极管直接上能级抽运 Nd:YVO₄ 薄片激光器

吴兴盛¹ 高健存¹ 唐新春¹ 王坤¹ 方茗¹ 王豫明² 曹有旺²

(¹清华大学物理系, 北京 100086
²清华大学 SMT 实验室, 北京 100086)

摘要 使用自行搭建的 24 通抽运系统, 实现了 880 nm 激光器二极管直接上能级抽运的 Nd:YVO₄ 薄片激光器。采用厚度为 0.3 mm、掺杂原子数分数为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 薄片晶体, 在 39.3 W 的抽运功率下获得了 20.6 W 的 1064 nm 连续激光输出, 光-光转换效率超过 50%。

关键词 激光器; 薄片激光器; Nd:YVO₄; 直接上能级抽运; 激光二极管抽运

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202001

20.6 W Nd:YVO₄ Thin Disk Laser with Laser-Diode Direct Upper-State Pumping

Wu Xingsheng¹ Gao Jiancun¹ Tang Xinchun¹ Wang Kun¹ Fang Ming¹

Wang Yuming² Cao Youwang²

(¹Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100086, China)
²SMT Laboratory of Tsinghua University, Beijing 100086, China)

Abstract A 880 nm laser diode direct upper-state pumped Nd:YVO₄ thin disk laser is demonstrated. With a 0.3 mm thick Nd-doping concentration of 0.5% Nd:YVO₄ disk and pump power of 39.3 W, 20.6 W output power at 1064 nm is obtained and the optical-optical efficiency exceeds 50%.

Key words lasers; thin disk laser; Nd:YVO₄; direct upper-state pump; laser diode pump

OCIS codes 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器由于其结构紧凑、可靠性高、效率高、寿命长等优点,在激光加工、医疗、测量、显示、航空航天等领域有广泛的应用。薄片激光器因其能够对热问题进行有效处理,可以同时实现高输出功率、高光束质量和高效率,因此被认为是一种非常有潜力的固体激光器。自1993年德国 Stuttgart 大学的 Giesen 等^[1]首次提出并实现以来,薄片激光器的输出功率一再提高,目前连续型激光器的单片输出功率可超过 5 kW,而用多

片串联形式可获得 10 kW 以上的连续激光输出^[2]。国内对薄片激光器的研究近年来也有不少进展,清华大学物理系光学实验室于 2002 年实现 16 W 连续输出 Yb:YAG 薄片激光器^[3],之后进行了腔内倍频及调谐研究^[4,5]。2007 年中国工程院采用两片 Nd:YAG 薄片晶体获得了 1.5 kW 连续激光输出^[6],华北光电技术研究所和固体激光技术重点实验室在 2011 年用四片串联的方式获得了 2.15 kW 的 Nd:YAG 薄片激光器^[7]。

本文介绍了所用的激光晶体性质和实验装置,

收稿日期: 2012-06-07; **收到修改稿日期**: 2012-08-17

基金项目: 国家 973 计划(2010CB922901)资助课题。

作者简介: 吴兴盛(1986—),男,硕士研究生,主要从事薄片激光器方面的研究。E-mail: ice_sea047@163.com

导师简介: 高健存(1962—),男,副教授,博士生导师,主要从事激光及非线性光学方面的研究。

E-mail: gaojc@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

实现了 880 nm 直接上能级抽运的 Nd:YVO₄ 薄片激光器,在近 40 W 抽运功率下,获得了 20.6 W 的 1064 nm 连续激光输出,光-光转换效率超过 50%。

2 激光晶体及实验装置

2.1 晶体性质

Nd:YVO₄ 晶体是近年来广泛应用于 1064 nm 激光输出的一种材料,其能级结构如图 1 所示。Nd:YVO₄ 的 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} 跃迁产生 1064 nm 辐射,发射截面约是 Nd:YAG 的 5 倍。当用 808 nm 附近的激光抽运时,Nd³⁺ 离子跃迁到 ⁴F_{7/2}、⁴F_{5/2} 等吸收能带,然后几乎全部通过无辐射跃迁迅速降落到 ⁴F_{3/2} 能级,也可用 880 nm 的激光直接抽运到上能级 ⁴F_{3/2},与 808 nm 抽运相比,这种方法有更小的热耗散和更高的量子效率,但其不足在于 Nd:YVO₄ 在 880 nm 处的吸收截面较小,吸收带宽较窄,约为 2.8 nm。

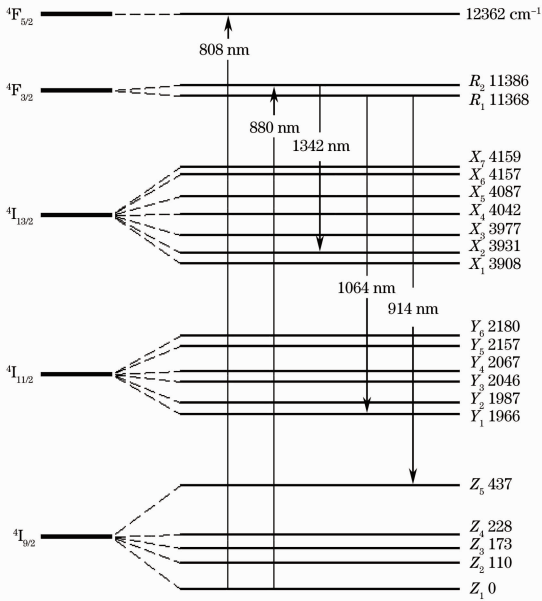


图 1 Nd:YVO₄ 能级结构

Fig. 1 Energy level structure of Nd:YVO₄

2.2 实验装置

图 2 为实验装置示意图。其中 880 nm 的抽运源采用光纤耦合半导体激光器,光纤的数值孔径为 0.18,纤芯直径为 400 μm。所用抽运源是 nLight 公司生产的 NL-P440-0880 型 LD,其最大输出功率为 40 W,输出光谱中心波长随功率增加而增加,半峰全宽约为 2 nm,适合于 Nd:YVO₄ 880 nm 的窄带宽吸收。在光纤耦合输出端后面放置了一个扩束透镜,焦距为 12.5 mm,其主要作用是将抽运光的发散角减小,使得入射的抽运光近似为平行光。抽运

光通过扩束透镜准直后入射到由中间开孔的抛物面镜、棱镜组以及晶体 Nd:YVO₄ 组成的 24 通抽运系统中,棱镜和抛物面镜上都镀有对抽运光的高反膜。晶体前表面镀有对抽运光和激光的增透膜,后表面镀有对抽运光和激光的高反膜。晶体通过特殊工艺焊接到热沉上,热沉材料为紫铜,内部开有通道,通以冷却水进行冷却。输出耦合镜上镀有对激光有一定透射率的反射膜。晶体的后表面与输出耦合镜构成谐振腔。激光功率测量使用 Gentec 公司产的 SOLO-PE 型激光功率计,激光光谱采用 AvaSpec-2048 型光纤光谱仪测量。

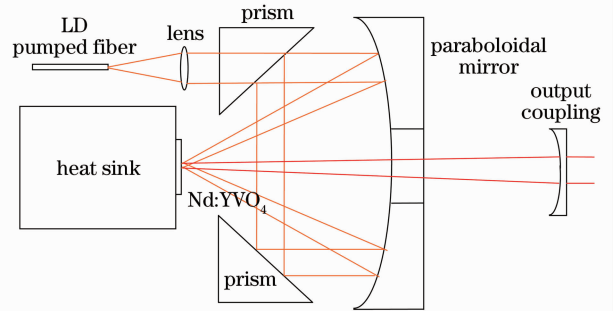


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

2.2.1 激光晶体参数的设计

根据目前国内薄片晶体加工的工艺水平以及国际上通用的掺杂浓度,并结合理论模拟分析结果,实验选用 Nd:YVO₄ 薄片晶体的具体参数为:尺寸大小为 6 mm×6 mm×0.3 mm,掺杂原子数分数为 0.5%。

按理论模拟分析得到,当晶体长度为 0.3 mm、掺杂原子数分数为 0.5% 时,经过本实验搭建的 24 通之后,抽运光的吸收效率约为 86%。

2.2.2 激光谐振腔的设计

实验中采用的激光谐振腔为平凹腔。薄片晶体后表面作为其中一个腔镜,并镀有对抽运光和激光

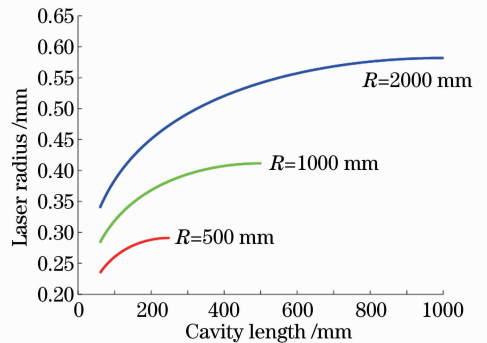


图 3 晶体上激光基膜半径与腔长关系

Fig. 3 Relationship between laser radius in crystal and cavity length

的高反膜。用平凹镜作为另一个腔镜，平凹镜镀有对激光部分透射率的反射膜。用谐振腔理论计算得到在输出镜曲率半径 R 不同的情况下，晶体上的激光基模半径随腔长变化的曲线如图 3 所示。

实验所选用的腔长为 95 mm，输出镜的曲率半径为 500 mm，从图 3 可以看出其基模半径为 0.24 mm，比实验中所用到的抽运光斑半径 0.56 mm 要小。这样，在操作实验的过程中，能够比较容易出光，并能获得多模激光模式。

3 实验结果及讨论

采用掺杂原子数分数为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体以及曲率半径为 500 mm 的输出耦合镜，谐振腔长为 95 mm，保持冷却水温度为 17 °C，测得不同透射率下激光输出曲线如图 4 所示，最佳透射率 T 为 3%。在 39.3 W 的抽运功率下，获得的 1064 nm 激光最大输出功率为 20.6 W，光-光转换效率 η_{oo} 超过 50%。

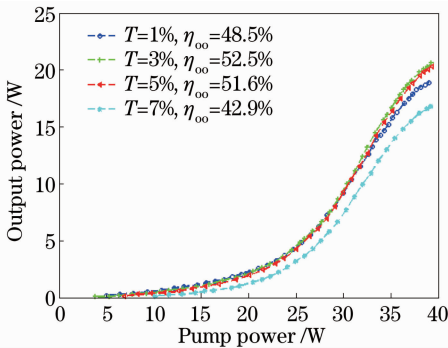


图 4 不同输出耦合镜透射率下 1064 nm 输出曲线
Fig. 4 Experimental results of different outcoupling fractions at 1064 nm

由于实验采用 LD 抽运源在不同输出功率下中心波长在变化，使得激光输出曲线的形状呈不规则 S 型。为此，分析了抽运源光谱发射特性对激光输出的影响。

激光晶体对抽运光的吸收效率取决于抽运光光谱与晶体吸收谱的重叠效率，重叠效率为

$$P \propto \int \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_0/2)^2} \times \frac{1}{(\nu - \nu_1)^2 + (\Delta\nu_1/2)^2} d\nu, \quad (1)$$

式中 ν_0 为 Nd:YVO₄ 在 880 nm 附近吸收谱的中心频率 ($\lambda_0 = 879.8$ nm), $\Delta\nu_0$ 为吸收宽度, ν_1 为抽运光发射光谱中心频率, $\Delta\nu_1$ 为发射谱宽度。使用光谱仪测得在冷却水温度保持在 17 °C 时，抽运源中心波长

λ_1 (nm) 与抽运电流 I (A) 的关系近似为

$$\lambda_1 = 1.54I + 870.7. \quad (2)$$

设在 $\nu_0 = \nu_1$ 时的重叠效率为 1，由此计算得重叠效率曲线如图 5 所示，与激光输出曲线的形状非常相似，可知抽运源波长变化引起的重叠效率变化的确是激光输出曲线呈 S 型的主要原因。

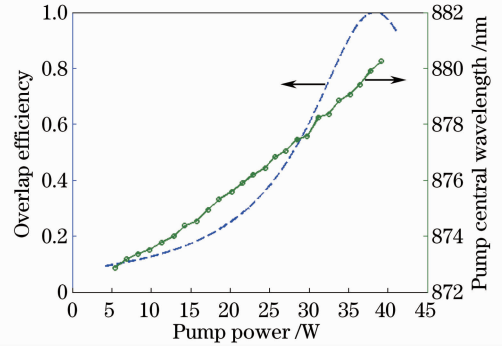


图 5 抽运光发射谱与 Nd:YVO₄ 晶体吸收谱的重叠效率
Fig. 5 Overlap efficiency of LD spectrum and Nd:YVO₄ absorption spectrum

4 结 论

采用自行搭建的 24 通抽运系统，实现了 880 nm LD 直接上能级抽运的 Nd:YVO₄ 薄片激光器，在近 40 W 的抽运功率下获得了 20.6 W 的 1064 nm 激光输出，光-光转换效率超过 50%。抽运光光谱与 Nd:YVO₄ 晶体吸收谱的重叠效率是造成激光输出曲线呈不规则 S 型的主要原因。

参 考 文 献

- 1 A. Giesen, H. Hugel, A. Voss *et al.*. Scalabel concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1994, **58**(5): 365~372
- 2 A. Giesen, J. Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(3): 598~609
- 3 Li Chao, Xu Zhen, Li Junlin *et al.*. Diode pumped Yb:YAG thin disk laser achieves 16 W CW output [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, **19**(2): 104~108
李超, 徐震, 李俊林等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器获得 16 W 连续激光输出 [J]. *量子电子学报*, 2002, **19**(2): 104~108
- 4 Shan Xinyan, Wei Xiaoyu, Wu Nianle *et al.*. Study on the beam quality of diode pumped Yb:YAG thin disk laser and the intracavity frequency doubling in V-type resonator [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(5): 587~591
单欣岩, 魏晓羽, 吴念乐等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器光束质量及 V 型腔腔内倍频的研究 [J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(5): 587~591
- 5 Ma Tiankui, Liu Xiaomeng, Li Junlin *et al.*. Tuning and intracavity frequency doubling of diode pumped Yb:YAG thin disk laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, **25**(2): 161~165
马天魁, 刘晓萌, 李俊林等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激

- 光器调谐及腔内倍频的研究[J]. 量子电子学报, 2008, **25**(2): 161~165
- 6 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 37~40
- 姚震宇, 蒋建锋, 涂 波 等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 37~40
- 7 Liu Yang, Wang Chao, Tang Xiaojun *et al.*. Laser diode-pumped four Nd:YAG disks laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202007
- 刘 洋, 王 超, 唐晓军 等. 激光二极管抽运四片串联 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1202007

栏目编辑: 宋梅梅