

文章编号: 0258-7025(2007)12-1629-05

879 nm 直接抽运提高 Nd:GdVO₄ 激光器性能

李旭东, 于欣, 金凤文, 彭江波, 张文平, 于俊华, 陈德应

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 激光二极管(LD)大功率端面抽运固体激光器(DPSSL)中的热效应会影响到激光器的各个方面,使得激光输出效率下降,光束质量变坏、谐振腔的稳定性变差等。采用新波段879 nm取代808 nm,将粒子直接激励到激光发射上能级,降低无辐射弛豫过程产生的热量,有效地减少热的产生,降低激光二极管端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体的热效应,获得更高性能的激光输出。在相同条件下通过879 nm激光二极管直接端面抽运及808 nm激光二极管间接端面抽运 Nd:GdVO₄ 激光器的实验比较,结果表明,在较高抽运功率下采用879 nm抽运提高了 Nd:GdVO₄ 激光器的激光输出性能。最后采用879 nm激光二极管端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体棒直线腔方案,在16.3 W的吸收抽运功率下,获得最大连续输出功率9.8 W的 TEM₀₀ 模1063 nm激光输出,对吸收抽运光的光-光转换效率高达60.1%,斜率效率达68.4%。

关键词 激光技术;Nd:GdVO₄ 激光器;直接抽运;879 nm激光二极管;热效应

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Performance Improvement of Nd:GdVO₄ Laser under 879 nm Direct Pumping

LI Xu-dong, YU Xin, JIN Feng-wen, PENG Jiang-bo,
ZHANG Wen-ping, YU Jun-hua, CHEN De-ying

(Institute of Opto-Electronics Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract Thermal effect in the laser diode (LD) high-power pumped solid-state lasers will reduce the efficiency of output power, decrease the output beam quality, deteriorate the resonator stability and so on. The novel 879 nm LD instead of 808 nm LD was used to pump Nd:GdVO₄ crystal rod directly, driving Nd³⁺ ions into the laser emitting level, avoiding useless heat generation during no-radiation transition and reducing the thermal effects efficiently. In the same experimental conditions, the comparison on performances of Nd:GdVO₄ laser between under 808 nm LD pumping and under 879 nm LD pumping was demonstrated, and showed that the performances of the former were superior to that of the latter. In the 879 nm LD pumped Nd:GdVO₄ plane-plane cavity laser, the maximum TEM₀₀ 1063 nm output power of 9.8 W is obtained at an absorbed pump power of 16.3 W, an optical-optical efficiency of 60.1% and a slope efficiency of 68.4% are achieved.

Key words laser technique; Nd:GdVO₄ laser; direct pumping; 879 nm laser diode; thermal effect

1 引言

激光二极管(LD)端面抽运的固体激光器(DPSSL)由于具有结构紧凑、光束质量好、寿命长等优点,近年来得到人们的广泛关注和深入研究^[1],

但激光晶体的热效应问题却是阻碍它向更高输出功率、更高光束质量发展的严重障碍。为降低激光晶体的热效应影响,人们使用各种措施改善晶体的受热情况,包括改变晶体的参量(降低掺杂浓度^[2]、选

收稿日期:2007-06-19;收到修改稿日期:2007-07-02

基金项目:哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:李旭东(1980—),男,山东人,博士研究生,主要从事激光二极管抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: kevin2025@163.com

导师简介:陈德应(1965—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事强场物理和非线性光学方面的研究。

E-mail: dychen@hit.edu.cn

择合适的形状及尺寸以增大散热接触面积、采用板条^[3]、薄片^[4]、复合晶体^[5]等),或者改善晶体的散热措施(循环水冷却、双端面抽运^[6]、端面镀金刚石膜^[7]、钢包等),这些方法都在一定程度上降低了晶体的热效应,并取得了一定的散热效果。但这些方法的不足之处是:都是在晶体先产生大量热的前提下,再想方设法将其散掉,这无疑会加大散热的难度。而降低热效应影响的另一途径为尽量减少激光介质中热的产生。所谓“直接抽运”,就是将粒子由基态直接抽运到激光发射上能级,由此可减少无辐射弛豫过程产生的热量,既降低了热负载损耗,同时又提高了能量转换效率。其实早在激光二极管抽运固体激光器发展初期,国外就有人曾提出过采用“直接抽运”的方式,但直到最近几年,随着特殊波段激光二极管工艺的成熟及产业化,才使得人们对此的研究逐渐展开^[8,9]。本文报道了“直接抽运”方式的机制并进行了879 nm激光二极管与808 nm激光二极管端面抽运Nd:GdVO₄激光器的比较实验,获得最大连续输出功率9.8 W的TEM₀₀模1063 nm激光输出,对吸收抽运光的光-光转换效率高达60.1%,斜率效率达到68.4%。

2 879 nm 激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 晶体的抽运机制

Nd:GdVO₄晶体是1992年由俄罗斯科学家研制成功的一种新型激光晶体,由于其具有较高的受激发射截面($\sigma_{em} = 7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)、较高的热导率($K_c \approx 11.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)和适中的荧光寿命($\tau = 90 \sim 100 \mu\text{s}$)等优异的激光和物理特性而备受人们关注^[10]。Nd:GdVO₄晶体在800~900 nm之间有两条吸收谱线,分别为808.3 nm和879.1 nm^[11]。由于808.3 nm的吸收峰与传统商用的GaAlAs激光二极管的发射波长808 nm相匹配,且吸收截面较大,因此传统的激光二极管抽运Nd:GdVO₄晶体所用的抽运波长为808.3 nm。由图1可看出,808.3 nm抽运光把Nd³⁺从基态抽运到⁴F_{5/2}能级,但Nd³⁺在此能级的寿命非常短,可以通过快速的无辐射弛豫到亚稳态⁴F_{3/2}能级上,将此过程产生的约8%的热负载放出。而⁴F_{3/2}能级有相对长的荧光寿命,提供了有利实现粒子数反转的机制,通过受激发射实现⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2}的辐射跃迁产生1063 nm激光输出,这是一种间接方式能量转移的四能级系统。而采用新波段879 nm抽运时,会建立另一种直接方式能量转

移的四能级系统。它可将Nd³⁺直接抽运至⁴F_{3/2}激光上能级,这无疑消除了⁴F_{5/2} → ⁴F_{3/2}过程中产生的热负载,提高了抽运激光功率的利用率。但不足之处在于:根据文献[12]报道,对Nd³⁺掺杂原子数分数为1.0%的Nd:GdVO₄晶体来讲,室温下由⁴I_{9/2} → ⁴F_{3/2}的吸收跃迁,对879.1 nm π偏振光的峰值吸收截面仅为 $2.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,约是对808 nm的一半多,但在879.1 nm处的吸收线宽(~2.3 nm)相对808 nm处的吸收线宽(~1.6 nm)要宽,降低了对激光二极管的控温要求,且随着近年来激光二极管的迅速发展,技术的成熟,成本的降低,使得采用新波段879 nm激光二极管取代传统商用的808 nm激光二极管成为可能。

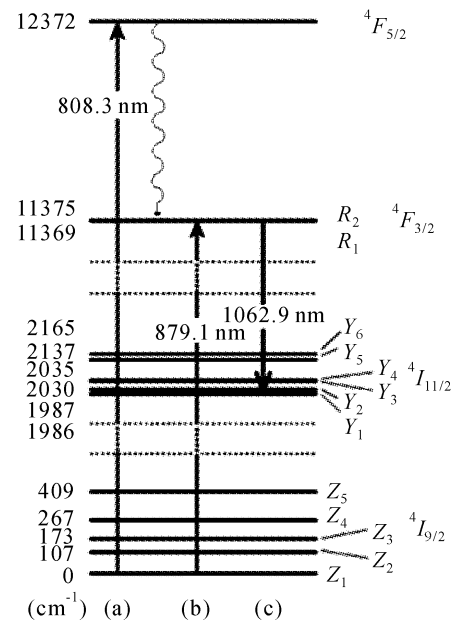


图1 Nd:GdVO₄晶体产生1063 nm激光发射的能级图

(a) 808 nm 间接抽运; (b) 879 nm 直接抽运;
(c) 1063 nm 激光发射

Fig. 1 Energy level diagram of Nd:GdVO₄ at emission wavelength of 1063 nm

(a) 808 nm indirect pumping; (b) 879 nm direct pumping;
(c) laser emission at 1063 nm

在不考虑浓度淬灭效应、激发态再吸收和杂质吸收的情况下,激光二极管抽运的固体激光器中抽运能量频移到产生激光的能量过程中,根据斯托克斯转换效率

$$\eta_{st} = \frac{h\lambda_p}{h\lambda_e} = \frac{\lambda_p}{\lambda_e}, \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, λ_p 为抽运光波长, λ_e 为受激发射波长。假设:1)抽运光与振荡光完全匹配;2)只产生受激发射;3)抽运量子效率为1,那么Nd:

GdVO₄ 晶体中的热负载可表示为

$$\eta_h = 1 - \eta_{st} = 1 - (\lambda_p / \lambda_e), \quad (2)$$

由此可见,在激光发射波长 λ_e 一定的情况下,晶体中的热负载主要由 λ_p 决定, λ_p 的大小直接影响到 η_h 的大小。经计算,为产生 1063 nm 激光输出,用传统 808 nm 波长激光抽运时,Nd:GdVO₄ 晶体中的热负载约为 24%,而采用 879 nm 波长抽运时,Nd:GdVO₄ 晶体中热负载减小为约 17%,相比于 808 nm 抽运,晶体的热负载减小了约 28%,这对于在高功率抽运时降低晶体的热效应,获得高性能激光输出非常有利。

3 实验研究

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示,Nd:GdVO₄ 晶体棒尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm,掺杂 Nd³⁺ 原子数分数为 0.5%,晶体棒 S₁ 面镀对 808 nm,879 nm 和 1063 nm 的增透膜,S₂ 面镀对 1063 nm 的增透膜;晶体棒用铜箔包裹后置于循环水冷却的紫铜热沉块上,冷却水温度保持在 14 °C;879 nm 光纤耦合激光二极管购自美国 nLight 公司,最大输出功率 120 W,808 nm 光纤耦合激光二极管为德国 LIMO 公司所产,最大输出功率 110 W,两台激光器的光纤芯径均为 400 μm,数值孔径均为 0.22;抽运光经准直-聚焦系统后在晶体中会聚成直径约 680 μm 的光斑;谐振腔前腔镜镀对 808 nm,879 nm 的增透膜和对 1063 nm 的高反膜,耦合输出镜为对 1063 nm 镀部分透射率的平面镜,谐振腔长约 95 mm。

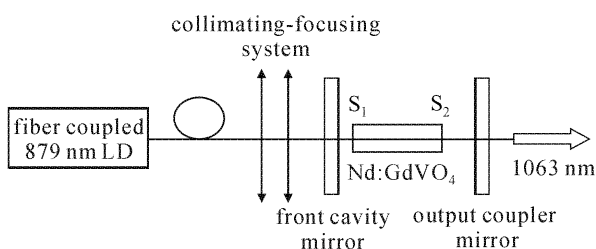


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of the experimental setup

3.2 实验结果及分析

分别采用 808 nm 激光二极管和 879 nm 激光二极管抽运同一根 Nd:GdVO₄ 晶体棒,在腔型结构及腔参量均相同的条件下,进行了 1063 nm 激光连续输出特性的比较实验。

图 3 为 808 nm 抽运下的 1063 nm 激光连续输

出功率与吸收抽运功率的关系。由图 3 可见,采用 808 nm 激光二极管抽运时,Nd:GdVO₄ 激光器的最佳透射率在 $T = 20\%$ 附近,获得的最高连续输出功率为 7.4 W,对吸收抽运光的斜率效率达 57%;在最大连续输出功率 7.4 W 的情况下,可明显观察到激光输出为多模输出,这可从图 4(a)和(b)中看出。

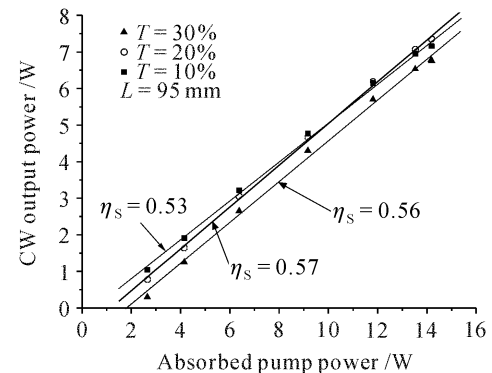


图 3 808 nm 抽运下的 1063 nm 激光连续输出功率与吸收抽运功率的关系

Fig. 3 Continuous wave (CW) output power at 1063 nm versus absorbed pump power under 808 nm pumping

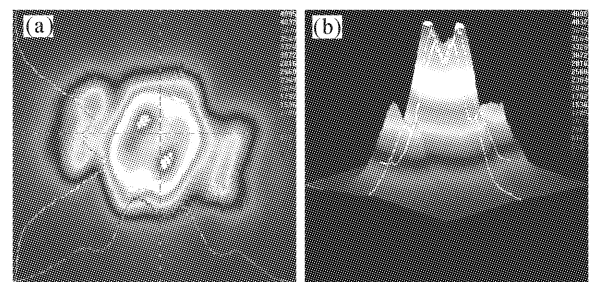


图 4 808 nm 抽运下最大连续输出功率 7.4 W 时激光器输出光束的强度分布

(a) 二维分布;(b) 三维分布

Fig. 4 Profile of laser beam intensity at maximum CW output power of 7.4 W under 808 nm pumping

(a) two-dimensionall (2D) distribution;

(b) three-dimensional (3D) distribution

在保持实验条件不变的情况下,采用 879 nm 激光二极管作为抽运源取代 808 nm 激光二极管后,进行了 879 nm 抽运的 Nd:GdVO₄ 连续激光输出实验。从图 5 可看出,在最佳输出透射率 $T = 20\%$ 的条件下,可获得最高连续输出功率为 9.8 W,对吸收抽运光的斜率效率高达 68%。同时,从图 6(a)和(b)也可明显看出,激光器为 TEM₀₀ 模输出,进一步测得的 x 和 y 方向的光束质量因子分别为 2.73 和 1.95。通过图 3 和图 5 的比较可看出,激光器在相同参量下,采用 879 nm 激光二极管抽运相比于采用 808 nm 激光二极管抽运,不仅最高斜率效率高

11%，最大连续输出功率增加2.4 W，而且前者为基模输出，后者为多模输出。由此可看出采用879 nm抽运时激光器性能的提高正是由于在直接抽运方式下降低了热负载率所致，使得热透镜效应降低，光束质量提高，同时抽运光能量利用率也提高。为便于进一步比较，将实验中最佳输出透射率 $T = 20\%$ 时，808 nm激光二极管抽运和879 nm激光二极管抽运下的连续输出功率与吸收抽运功率的关系曲线拟合到同一张图(图7)中进行分析。

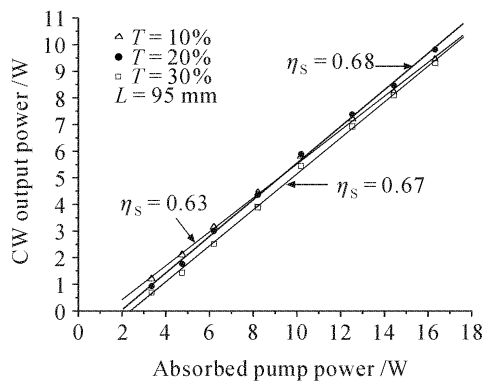


图5 879 nm抽运下的1063 nm激光连续输出功率与吸收抽运功率的关系

Fig. 5 CW output power at 1063 nm versus absorbed pump power under 879 nm pumping

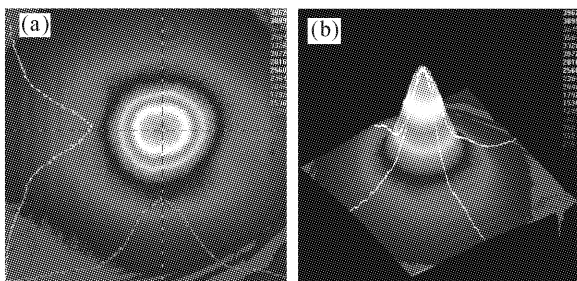


图6 879 nm抽运下最大连续输出功率9.8 W时激光器输出光束的强度分布

(a) 二维分布; (b) 三维分布

Fig. 6 Profile of laser beam intensity at maximum CW output power of 9.8 W under 879 nm pumping

(a) 2D distribution; (b) 3D distribution

从图7可以看出，808 nm抽运时的抽运阈值较879 nm抽运时的抽运阈值要低一些，这是由于Nd:GdVO₄在879 nm处的吸收截面比808 nm处小。两条直线在吸收抽运功率约6 W处有一交叉点，当吸收抽运功率在约6 W以下时，808 nm激光二极管抽运下获得的1063 nm激光功率相对879 nm激光二极管抽运下的要高一些，当吸收抽运功率高于6 W时，情况正好相反。其原因为由于掺杂浓度一定的Nd:GdVO₄晶体对两波长抽运光的吸收截面差异所致。

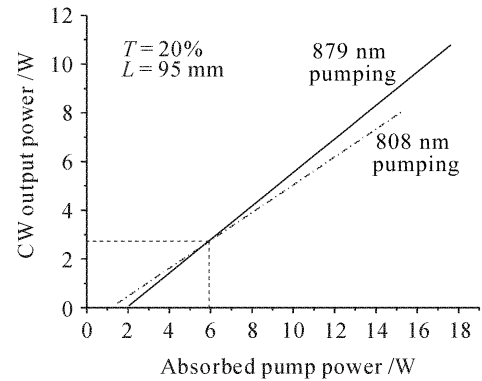


图7 808 nm和879 nm激光二极管抽运时1063 nm激光输出功率特性比较

Fig. 7 Comparison of the output power at 1063 nm versus absorbed pump power under 808 nm pumping and 879 nm pumping

在小于6 W的吸收抽运功率下，晶体的热效应并不是很严重，使得在吸收抽运功率较低的情况下采用808 nm激光二极管抽运可获得相对高的输出功率；而当吸收抽运功率高于6 W时，晶体的热效应趋于严重，随着吸收抽运功率的进一步提高，879 nm激光二极管抽运下较小热负载的优势便逐渐体现出来，而相对于808 nm激光二极管抽运时减小的约28%的热量在高吸收抽运功率下足以对激光器的输出功率、斜率效率及光束质量产生关键影响。

4 结 论

通过采用879 nm激光二极管与808 nm激光二极管端面抽运Nd:GdVO₄激光器连续输出性能的比较实验，表明采用879 nm直接抽运方式有效地降低了晶体的热负载，改善了能量利用效率。在16.3 W的吸收抽运功率下，获得了最高9.8 W的TEM₀₀模1063 nm激光输出功率，斜率效率高达68.4%，相对于吸收抽运功率的光-光转换效率达到60.1%。充分说明了采用879 nm激光二极管取代传统的808 nm激光二极管端面抽运Nd:GdVO₄激光器可提高激光输出性能。今后通过进一步选择合适腔结构并优化晶体参量、腔参量和制冷控温技术，稳定激光二极管抽运波长，相信继续开展879 nm激光二极管抽运Nd:GdVO₄激光器获得高功率、高光束质量的研究仍有较大潜力。

参 考 文 献

- 1 Tso Yee Fan, Robert L. Byer. Diode laser-pumped solid state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6):895

- ~912
- 2 Li Jian, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. Influence of the Nd³⁺-doped concentration on the output performance of a high-power all-solid-state Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(4):298~302
李健,何京良,侯玮等. Nd³⁺掺杂浓度对大功率全固态 Nd:YVO₄激光器输出特性影响的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(4):298~302
 - 3 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang *et al.*. Kilowatt laser diode-pumped solid-state heat capacity slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):280~286
郭明秀,李劲东,付文强等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):280~286
 - 4 Christian Stewen, Karsten Contag, Mikhail Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disk laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4):650~657
 - 5 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
 - 6 Li Xudong, Yu Xin, Yu Junhua *et al.*. Laser diode double-end-pumped acousto-optically Q-switched Nd:GdVO₄ laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):461~464
李旭东,于欣,于俊华等. 激光二极管双端抽运声光调 Q 高重复频率 Nd:GdVO₄激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):461~464
 - 7 Yitshak Tzuk, Alon Tal, Sharone Goldring *et al.*. Diamond cooling of high power pumped Nd:YVO₄ and Nd:YAG laser [C]. *SPIE*, 2005, **5792**:61~75
 - 8 V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Highly efficient laser emission in concentrated Nd:YVO₄ components under direct pumping into the emitting level [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(4-6):431~435
 - 9 S. Bjurshagen, R. Koch, F. Lauerll. Quasi-three-level Nd:YAG laser under diode pumping directly into the emitting level [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **261**(1):109~113
 - 10 Yin Zhao, Shen Deyuan, Ueda Ken-Ichi. A laser-diode pumped Nd:GdVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1374~1377
尹钊,沈德元,植天宪. 激光二极管抽运的 Nd:GdVO₄激光器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1374~1377
 - 11 Zhang Qingli, Yin Shaotang, Wang Aihua *et al.*. Crystal growth and spectral properties of Nd:GdVO₄ [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2002, **19**(4):310~313
张庆礼,殷绍唐,王爱华等. Nd:GdVO₄的晶体生长和光谱特性[J]. *量子电子学报*, 2002, **19**(4):310~313
 - 12 Nicolaie Pavel, Takunori Taira. High-power continuous-wave intracavity frequency-doubled Nd:GdVO₄-LBO laser under diode pumping into the emitting level [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3):631~637