

文章编号: 0258-7025(2004)01-0019-03

大功率激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器

张红瑞¹, 高明义¹, 郑 义¹, 姚建铨²

(¹ 郑州大学河南省激光应用技术重点实验室, 河南 郑州 450052; ² 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 报道了利用掺杂浓度为 0.3 at.-%, 通光长度为 10 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质, 带光纤耦合的激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器。在抽运功率为 27.365 W 时, 获得了 14.85 W 的 TEM₀₀ 模输出, 光-光转换效率为 60.49%, 斜率效率达 64.5%。在上述基础上对晶体的掺杂浓度和晶体长度对激光器性能的影响进行了分析。

关键词 激光技术; Nd:YVO₄ 激光器; 端面抽运; 激光二极管; 掺杂浓度

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

High Power Diode-end-pumped Nd:YVO₄ Laser

ZHANG Hong-rui¹, GAO Ming-yi¹, ZHENG Yi¹, YAO Jian-quan²

(¹ Henan Key Laboratory of Laser Application Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)
(² College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A fiber-coupled diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser with a Nd:YVO₄ crystal of 0.3 at.-% doped concentration and 10 mm length was reported in this paper. CW TEM₀₀ mode output of 14.85 W was obtained at a pump power of 27.365 W, resulting in an optical conversion efficiency of 60.49%, and a slope efficiency of 64.5%. The effect of doped concentration and crystal length on the performance of Nd:YVO₄ was also analyzed.

Key words laser technology; Nd:YVO₄ laser; end-pumped; laser diode; doped concentration

1 引 言

Nd:YVO₄ 晶体因具有发射截面大、吸收带宽和输出为线偏振等优良的激光性能, 近几年对其的研究和应用越来越多^[1~5]。由于 Nd:YVO₄ 晶体的导热性和机械性能比 Nd:YAG 晶体差, Nd:YVO₄ 晶体的早期应用主要是小功率器件, 近年来通过有效的冷却, 在尽可能消除激光晶体因吸收抽运光而产生的晶体热透镜效应后, Nd:YVO₄ 晶体已经在大功率全固态激光器中得到越来越多的应用。减小 Nd:YVO₄ 晶体热透镜效应的有效途径之一是适当减小晶体中 Nd³⁺ 的掺杂浓度, 增加晶体的长度。对于晶体中 Nd³⁺ 掺杂浓度和晶体长度对激光输出特性的影响也已进行了初步研究^[1~3], 文献^[1]中对掺杂浓度分别为 0.5, 0.7, 1.0 at.-%, 长度为 5 mm 的 3 种 Nd:YVO₄ 晶体的激光性能进行了比较, 得出当输入

功率为 5.1 W 时, 掺杂浓度为 0.5 at.-% 的 Nd:YVO₄ 晶体最好, 获得了 3.1 W 的激光输出, 光-光转换效率为 60.8%, 斜率效率达到 71%; 文献^[3]在对掺杂浓度分别为 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 at.-%, 长度为 1~5 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体的性能进行测量后, 综合考虑既要节省晶体材料, 又要有较高的斜率效率和较低的阈值, 得出掺杂浓度为 2.0 at.-%, 长度为 2 mm 是最佳的晶体规格, 用此激光晶体作增益介质, 当抽运光为 412 mW 时, 得到 187 mW 的激光输出, 抽运阈值为 39 mW, 斜率效率为 50.0%, 光-光转换效率为 45.4%。

我们使用掺杂浓度为 0.3 at.-%, 长度为 10 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质, 抽运功率为 27.365 W 时, 获得了 14.85 W 的 1064 nm TEM₀₀ 模激光输出, 抽运阈值为 1.52 W, 光-光转换效率为 60.49%, 斜率效率为 64.5%。

收稿日期: 2002-09-02; 收到修改稿日期: 2002-11-11

基金项目: 河南省院士启动基金资助项目。

作者简介: 张红瑞 (1975—), 男, 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: i6y6@vip.sina.com

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,谐振腔采用简单的平凹腔结构,为了调整方便和保证调整精度,用独立的平面镜代替文献中常用的 Nd:YVO₄ 晶体的一个端面作为腔镜的做法。实验所用的抽运光源 LD 为 FAP-18-30 型带光纤耦合的激光二极管,光纤输出口直径为 800 μm,数值孔径小于 0.20,最大输出功率为 30 W;为了更好地实现模匹配,减小激光器运行过程中 Nd:YVO₄ 晶体的热效应,保证抽运功率密度小于 Nd:YVO₄ 晶体的光损伤阈值,LD 与谐振腔之间的耦合匹配采用的准直聚焦系统焦距为 30 mm,传输效率为 89.7%;Nd:YVO₄ 晶体大小为 4 mm×4 mm×10 mm,α 轴切割,通光长度为 10 mm,Nd³⁺ 的掺杂浓度为 0.3 at.-%。为防止晶体两通光面形成标准具效应产生自激振荡,将晶体一通光面切成 1° 的劈形,晶体的两个通光面镀 1064 nm 和 808 nm 增透膜,晶体的侧面用铜片包住装在水冷却的紫铜夹内,紫铜夹用 HX-10555 型恒温循环器进行温度控制,实验中发现恒温循环器的温度控制在 16℃ 时,激光器的运行效率最高。谐振腔的入射镜为平镜,一面镀 808 nm 增透膜,另一面镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜;输出镜为平凹镜,曲率半径为 100 mm,凹面镀 808 nm 高反膜,输

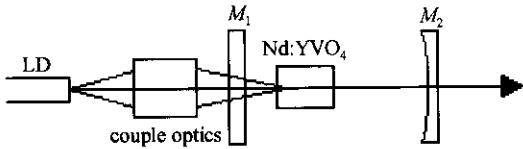


图 1 激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

出镜对 1064 nm 波长为部分透过,谐振腔腔长约 85 mm;激光器输出功率用 8025C 型双通道功率/能量计测量,探头型号为 818T-150。

3 理论与实验结果分析

Nd:YVO₄ 晶体对 1.064 μm 的能级跃迁是典型的四能级结构,在强光抽运的情况下,其阈值抽运功率 P_{th} ^[6],输出功率 P_{out} ^[1,7] 和斜率效率 η_s ^[8] 表示为

$$P_{th} = \frac{\pi h c (\omega_c^2 + \omega_p^2) \cdot \delta}{4 \sigma \lambda_p \eta_p} \quad (1)$$

$$P_{out} = \eta_p \cdot \eta_a \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{T}{\delta} \cdot P_{in} \quad (2)$$

$$\eta_s = \eta_p \cdot \frac{h\nu_l}{h\nu_p} \cdot \frac{T}{\delta} \quad (3)$$

上述 3 式中 ω_c, ω_p 分别为腔模和抽运光斑束腰, $h\nu_p$ 为抽运光子能量, $h\nu_l$ 为出射光子能量, η_a 为增益介质对抽运光的吸收效率, τ 为增益介质上能级荧光寿命, σ 为净增益截面, δ 为腔内损耗, η_p 为量子效率, λ_p 为抽运光波长, λ 为振荡光波长, P_{in} 为入射到增益介质表面的抽运功率。而腔内损耗 δ 又包括三部分^[8]: 输出损耗 T , 腔结构本身的固有损耗 δ_f 和与晶体的掺杂浓度、长度及抽运光功率有关的吸收损耗 δ_a , 谐振腔确定后, T 及 δ_f 为常数。文献[1]中对于 808 nm 的 π 偏振吸收, 根据实验得出了吸收损耗 δ_a 和增益介质对抽运光的吸收效率 η_a 的经验公式

$$\delta_a(\rho, l, P_{in}) = C \cdot \rho \cdot l + C_1 \cdot \sqrt{P_{in}} \quad (4)$$

$$\eta_a = 1 - \exp(-C_2 \cdot \rho^b \cdot l) \quad (5)$$

式中, C, C_1, C_2 和 b 为实验常数, $C = 0.04 \text{ cm}^{-1}$, $C_1 = 0.001 \text{ W}^{-1/2}$, $C_2 = 25$, $b = 1.5$ 。将(4), (5) 两式代入(1) ~ (3) 式得到

$$P_{th} = \frac{\pi h c (\omega_c^2 + \omega_p^2) \cdot [T + \delta_f + (C \cdot \rho \cdot l + C_1 \cdot \sqrt{P_{in}})]}{4 \sigma \lambda_p \eta_p} \quad (6)$$

$$P_{out} = \eta_p \cdot [1 - \exp(-C_2 \cdot \rho^b \cdot l)] \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{T}{T + \delta_f + (C \cdot \rho \cdot l + C_1 \cdot \sqrt{P_{in}})} \cdot P_{in} \quad (7)$$

$$\eta_s = \eta_p \cdot \frac{h\nu_l}{h\nu_p} \cdot \frac{T}{T + \delta_f + (C \cdot \rho \cdot l + C_1 \cdot \sqrt{P_{in}})} \quad (8)$$

从(4)式可以看出,高掺杂浓度、大晶体尺寸和大的抽运功率都会引起腔内吸收损耗的增大,从(6), (7)式可以看出,如果忽略由于晶体长度的变化而导致的谐振腔有效长度的变化并且输出耦合镜的透过率不变时,在强光抽运条件下,低掺杂浓度的晶体更能实现高功率的激光输出,而掺杂浓度、晶体长

度和抽运光功率的变化会导致阈值功率的变化;由(8)式可知,在近阈值抽运时,斜率效率的大小主要由 $(C \cdot \rho \cdot l + C_1 \cdot \sqrt{P_{in}})$ 的值决定,要增大激光器的斜率效率,必须减小晶体的掺杂浓度和晶体长度。由于在强光抽运时,晶体的热透镜效应是影响激光器性能的一个重要因素,为了减小晶体的热效应,必

须相应地增加晶体的长度。对 Nd:YVO₄ 晶体,在其通光长度、掺杂浓度及抽运功率之间存在一个最佳匹配问题。

实验中分别在不同的耦合输出镜透过率(5%, 10%, 15%和 20%)的条件下,对激光器的输出功率进行了测量,发现当耦合输出镜的透过率为 10%时,激光器的输出功率最高。实验时,控制激光二极管的温度使其发射中心波长与 Nd:YVO₄ 晶体吸收峰重合以最大限度地提高抽运效率。在谐振腔长约为 85 mm,抽运光斑直径约为 900 μm 时,测量了不同输入功率下的输出功率,输出功率随抽运功率的变化曲线如图 2 所示。

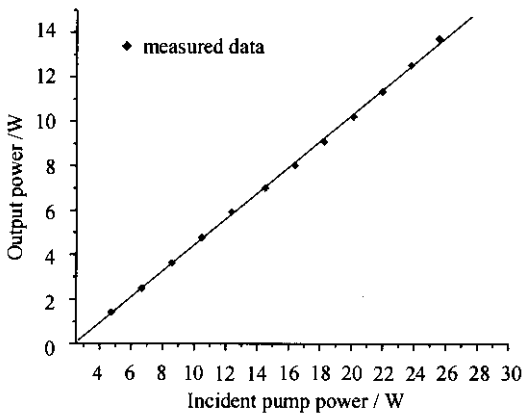


图 2 Nd:YVO₄ 激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Curve of the output powers as a function of incident pump power of LD pumped Nd:YVO₄ laser

在输出功率为 14 W 附近,我们对它的模式进行了测量。用针孔探测器在一定位置对光束进行平行和垂直方向扫描,归一化后得到光束在平行和垂直方向的强度分布曲线都近似为高斯分布(见图 3, (a)为平行方向, (b)为垂直方向),证明输出光为 TEM₀₀ 模。

从图 2 可以看出,在大功率抽运时,低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体具有优良的激光输出特性,增大晶体的长度能有效消除晶体的热效应,这与上述理论一致。在本实验中没有出现明显的热透镜效应,无饱和现象出现,这说明若采用更大功率的激光二极管作为抽运源,可能会获得更高的输出功率,但抽运阈值会增高,相应地斜率效率会下降。

我们对该激光器的输出功率稳定性进行了测量,每隔 1 min 从功率计中读取一个数值,共取 11 个数,经计算得出 10 min 内该激光器的输出功率稳定度约为 1%。

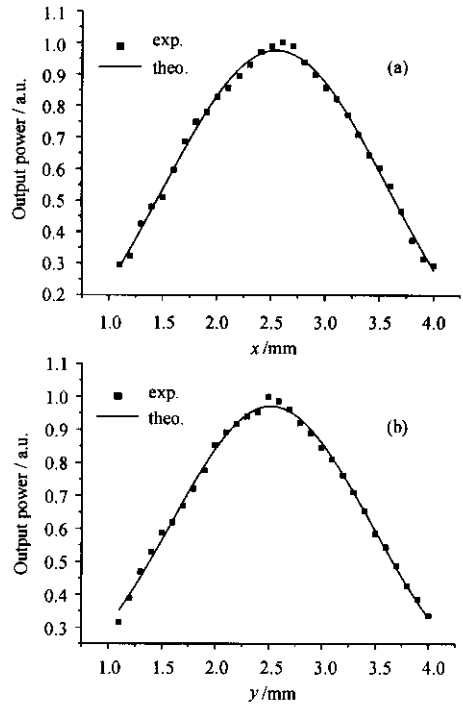


图 3 Nd:YVO₄ 激光器的激光模式

Fig. 3 Mode of the Nd:YVO₄ laser

参 考 文 献

- 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
- Li Jian, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. Performance of a laser-diode pumped high efficient Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4):484~488
李 健,何京良,侯 玮 等. 大功率激光二极管抽运 Nd:YVO₄激光器的特性研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4):484~488
- Zhengping Wang, Lianke Sun, Shaojun Zhang *et al.*. Investigation of LD end-pumped Nd:YVO₄ crystals with various doping levels and lengths [J]. *Optics & Laser Technol.*, 2001, **33**(1):47~51
- He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. 8.8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(6):481~484
何京良,侯 玮,张恒利 等. LD 抽运 Nd:YVO₄腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(6):481~484
- Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping *et al.*. LD-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser with high repetition rates and short pulse width [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29** (6):489~491
杜晨林,刘均海,王正平等. LD 抽运声光调 Q 高重复频率短脉宽 Nd:YVO₄激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):489~491
- T. Y. Fan, M. R. Kokta. End-pumped Nd:LaF₃ and Nd:LaMgAl₁₁O₁₉ lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25** (8):1845-1849
- T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6):895~912
- Dai Teli. Semiconductor Diode-pumped Solid-state Laser [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1993. 81~93
戴特力. 半导体二极管抽运的固体激光器[M]. 成都:四川大学出版社, 1993. 81~93