

LD 泵浦的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd: YVO₄ 晶体 高效率激光器*

张恒利 何京良 侯 玮 冯宝华 许祖彦
(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

王继扬
(山东大学晶体材料研究所 济南 250100)

提要 报道了光纤耦合输出大功率 LD 模块泵浦的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd: YVO₄ 晶体高效率激光器, 在泵浦功率为 6.6 W 时, 激光输出达 2.27 W, 光-光转换效率为 34.4%, 斜效率达 45%。利用 KTP 晶体进行腔内倍频, 得到 70 mW 的 $0.67 \mu\text{m}$ 激光输出。

关键词 LD 泵浦, Nd: YVO₄ 激光器, KTP 晶体

1 引 言

$1.3 \mu\text{m}$ 区域激光由于与硅光纤传输窗口吻合而有非常广泛的应用前景, 作为中红外参量激光器的泵浦源将更为有效; 其倍频的红色激光取代氦离子激光也将有相当的市场。近几年来, 由于 Nd: YVO₄ 晶体相对于常用的 Nd: YAG 晶体具有发射截面大, 吸收带宽, 输出为线偏振等优点而成为激光二极管泵浦的固体激光器中研究最多的激光晶体之一^[1~3]。关于 Nd: YVO₄ 晶体的研究工作, 目前主要集中在 $1.06 \mu\text{m}$ 谱线及其倍频的 $0.53 \mu\text{m}$, 对于 $1.34 \mu\text{m}$ 谱线则研究得比较少。但是, 对于 Nd: YVO₄ 晶体来说, 在 $1.34 \mu\text{m}$ 处的发射截面仍是较大的。根据早期的文献^[4], 为 $(6 \pm 1.8) \times 10^{-19} \text{cm}^2$, 且其 $1.34 \mu\text{m}$ 谱线与 $1.06 \mu\text{m}$ 谱线的分支比为 0.24, 大于 Nd: YAG 晶体的 0.18^[5], 因此 Nd: YVO₄ 晶体不失为产生 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的最佳选择之一。1994 年, G. C. Bowkett 等^[6] 用激光二极管泵浦 Nd: YVO₄ 晶体微片, 在泵浦功率为 800 mW 时, 得到 91 mW 输出, 斜效率达 46%, 光-光转换效率为 11.4%。最近山东大学晶体材料研究所用 1 W 的 LD 泵浦, 在吸收泵浦功率为 515 mW 时, 获得了 157 mW 的 $1.34 \mu\text{m}$ 激光输出, 斜效率为 33.1%^[7], 利用 KTP 腔内倍频得到 3.6 mW 的红光输出^[8]。本文报道了光纤耦合输出大功率 LD 模块端面泵浦的 Nd: YVO₄ 晶体 $1.34 \mu\text{m}$ 激光器, 得到了稳定的基横模输出, 最大连续输出功率超过 2.27 W, 斜效率达到 45%, 光-光转换效率为 34.4%。同时利用 KTP 晶体进行了腔内倍频研究, 得到 70 mW 的红光输出。

* 国家高技术研究发展计划重大资助项目。

收稿日期: 1997-12-08; 收到修改稿日期: 1998-04-13

2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示。所用 LD 为美国 SDL 公司出品的光纤输出模块, 型号为 SDL-3450-P5, 最大输出功率为 10 W, 光纤输出口径为 400 μm , 数值孔径为 0.42, 室温下峰值波长在 806 nm, 峰值波长随温度变化系数约为 0.3 nm/°C, 该系统利用国产 HX-10555 型恒温循环器进行温度控制。

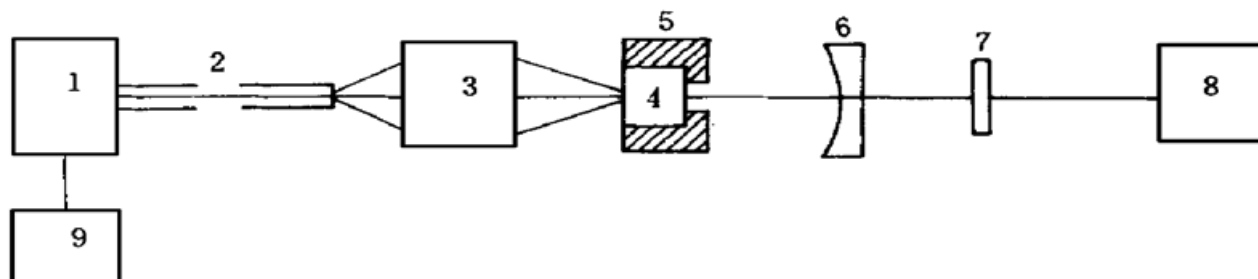


图 1 LD 泵浦 Nd:YVO₄激光器的实验装置

1: LD; 2: 光纤; 3: 耦合系统; 4: Nd:YVO₄晶体; 5: 热沉; 6: 输出镜; 7: 滤光片; 8: 功率计; 9: 温度控制器

Fig. 1 Experimental setup of the LD pumped Nd:YVO₄ laser

1: LD; 2: fibre; 3: coupling system; 4: Nd:YVO₄ crystal;

5: copper heatsink; 6: output mirror; 7: filter; 8: power meter; 9: temperature controller

由于在高功率泵浦下, Nd:YVO₄晶体的热效应比较严重, 为了减小激光器运行过程中的热效应, 采用了特殊设计的准直耦合系统。光纤输出的泵浦光束经该准直耦合系统后, 光斑被放大 2 倍, 即打在 Nd:YVO₄晶体上的泵浦光斑直径约为 800 μm 。这样一方面减小了泵浦光束发散角, 另一方面也使得泵浦功率密度远小于 Nd:YVO₄晶体的光损伤阈值^[5], 该系统的耦合效率约为 83%。激光谐振腔采用简单的平凹腔结构, 在激光腔设计过程中, 也考虑了高功率泵浦下激光晶体的热效应问题, 设计激光腔使泵浦光束腰远大于腔模束腰, 使得在腔模中 Nd:YVO₄晶体因受热比较均匀而减小热效应的影响^[9]。因此我们设计的腔长约为 50 mm, 则泵浦光斑半径约为 400 μm , 腔模束腰约为 146 μm , 基本符合上述要求。

所用 Nd:YVO₄晶体为中国科学院物理研究所生长加工, 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, a 轴切割, 通光长度为 5 mm, Nd 离子掺杂浓度约为 1% (原子百分数)。Nd:YVO₄晶体一端面镀 1.34 μm 高反膜 (反射率大于 99%) 和 808 nm 增透膜 (透过率大于 90%), 同时对 1.06 μm 波长的透过率约为 90%, 作为一面腔镜使用; 另一端面镀 1.34 μm 的增透膜 (透过率大于 99%)。在激光器运行过程中, Nd:YVO₄晶体利用循环水冷却。输出腔镜曲率半径为 100 mm, 对 1.34 μm 的透过率为 5%, 对 1.06 μm 的透过率大于 90%。激光二极管端面泵浦固体激光器的阈值为^[10]

$$P_{\text{th}} = \frac{\pi h c (w_c^2 + w_p^2) * \delta}{4 \sigma \tau \lambda_p \eta_p} \quad (1)$$

其中 h 为普朗克常数, c 为光速, λ_p 为泵浦光波长, w_c, w_p 分别为腔模和泵浦光斑束腰, δ_0 为腔的损耗包括输出镜的透过率 T , σ 为净增益截面, τ 为晶体上能级寿命, η_p 为量子效率。忽略腔模和上能级寿命的差别, 则 1.06 μm 谱线和 1.34 μm 谱线的阈值之比为

$$\frac{P_{1.06}}{P_{1.34}} = \frac{\sigma_{1.34} \delta_{1.06}}{\sigma_{1.06} \delta_{1.34}} \quad (2)$$

计算中取 $\sigma_{1.34}/\sigma_{1.06} = 0.24$, $\delta_{01}/\delta_{02} = 18$, 则可估算出其阈值之比约为 4.32。

实验中,控制 LD 模块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泵浦效率。对激光器输出光束用棱镜分光,没有发现 1.06 μm 激光输出。测量了激光器的输入-输出特性曲线,如图 2 所示。其中输入功率为经耦合系统后的泵浦功率,没有计及激光晶体前表面对泵浦光的反射损失。在泵浦功率为 6.60 W 时,得到 1.34 μm 激光输出最大功率达 2.27 W,对应的光-光转换效率为 34.4%,斜效率为 45%;激光器阈值为 1.3 W,略大于理论估算值。另外,图 2 中直线为拟合曲线。如前所述,为了减小 Nd: YVO₄晶体的热效应,设计的泵浦光斑半径比较大,约为 400 μm ,这是造成激光器阈值比较高的主要原因。用一维针孔探测器在距离激光器约 1m 的地方分别在水平和垂直方向进行一维扫描测量,证明输出为 TEM₀₀模。对激光器的稳定性也进行了测量,在输入泵浦功率为 4.9 W,激光器输出为 1.41 W 时,对激光器进行了 30 min 的连续监测,输出功率的不稳定性小于 2%。

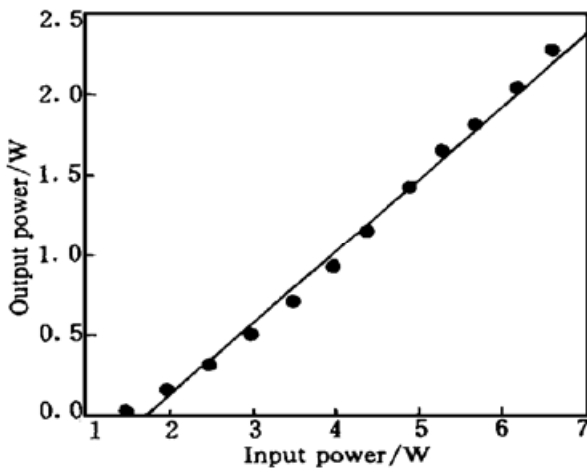


图 2 1.34 μm 激光输入-输出关系

Fig. 2 1.34 μm output as a function of pump power

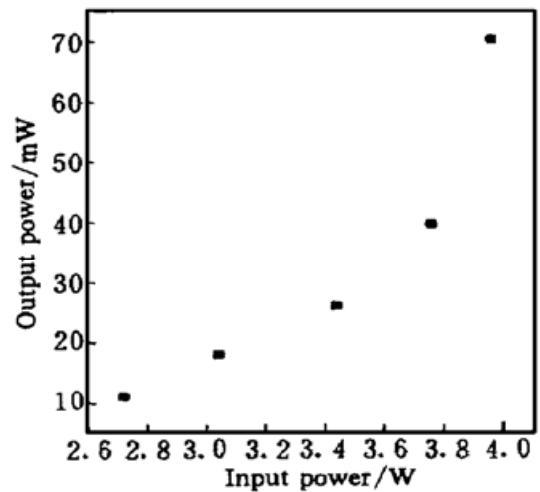


图 3 KTP 晶体腔内倍频 0.67 μm 激光输出与泵浦功率的关系

Fig. 3 Output power at 0.67 μm versus pump power

另外还利用 KTP 晶体进行了初步的腔内倍频实验。KTP 晶体为山东大学晶体材料研究所生长加工镀膜,为 I I 类位相匹配,匹配角 $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 59^\circ$, 尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm, 通光长度为 5 mm, 两端面均镀有 1.34 μm 和 0.67 μm 的双色增透膜。KTP 晶体置于腔内靠近 Nd: YVO₄晶体的一端。实验结果如图 3 所示,在泵浦功率为 4.1 W 时,获得 70 mW 的 0.67 μm 激光输出,光-光转换效率低于 2%。

目前,我们正在进行多镜热稳定腔的腔内倍频研究,以期进一步提高 1.34 μm 和 0.67 μm 激光的输出功率和转换效率。

参 考 文 献

- 1 R. Scheps, J. F. Myers, G. Mizell. High efficiency 1.06 μm output in a monolithic Nd: YVO₄ laser. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5546~ 5549
- 2 Y. Kitaoka, S. Ohmori, K. Yamamoto *et al.*. Stable and efficient green light generation by intracavity frequency doubling of Nd: YVO₄ laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(3): 299~ 301
- 3 He Huijuan, Lin Yueming, Lu Yutian. The characteristic study of high efficiency Nd: YVO₄ laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, **21**(8): 621~ 623 (in Chinese)
- 4 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher *et al.*. Stimulated emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd

- : YVO₄. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(12): 4907~ 4911
- 5 B. H. T. Chai. Recent development of high efficiency Nd miniature laser host materials; Joseph F. Becker, Andrew C. Tam, John B. Gruber, Lui Lam, *Novel Laser Sources and Applications*, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington USA, 1993. 5~ 18
 - 6 G. C. Bowkett, G. W. Baxter, D. J. Booth *et al.*. Single-mode 1.34 μm Nd: YVO₄ microchip laser with cw Ti: sapphire and diode laser pumping. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(13): 957~ 959
 - 7 Wang Changqing, Shen Deyuan, Lu Jianren *et al.*. Characteristics of LD-pumped Nd: YVO₄ laser operating at 1.34 μm. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(9): 1176~ 1179 (in Chinese)
 - 8 Wang Changqing, Shen Deyuan, Lu Jianren *et al.*. 1.34 μm intracavity frequency-double Nd: YVO₄ laser pumped by a laser diode. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(7): 577~ 580 (in Chinese)
 - 9 M. A. Kern, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Resonator design consideration for high-power of a Nd: YAG laser at 1.3 μm end pumped by a diode bar. *CLEO' 97*, 479~ 480, CFE4
 - 10 T. Y. Fan, M. R. Kokta. End-pumped Nd: LaF₃ and Nd: LaMgAl₁₁O₁₉ lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(8): 1845~ 1849

Study of a LD Pumped Nd: YVO₄ Crystal 1.34 μm Laser

Zhang Hengli He Jingliang Hou Wei Feng Baohua Xu Zuyan
(*Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Wang Jivang

(*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100*)

Abstract A high efficient diode laser pumped Nd: YVO₄ 1.34 μm laser is reported. The maximum output power of 2.27 W at 1.34 μm is obtained under the pump power of 6.6 W, the optical-to-optical conversion efficiency is up to 34.4%. Using a KTP crystal as the intracavity frequency doubler, a 70 mW, 0.67 μm red light at the pump power of 4.1 W is obtained.

Key words diode laser, Nd: YVO₄ crystal, KTP crystal