

文章编号: 0258-7025(2009)07-1831-04

高功率激光二极管端面抽运重复频率 Yb : YAG 激光器

蒋东宾 段文涛 徐美健 蒋新颖 於海武 李明中

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 采用 940 nm InGaAs 激光二极管(LD)阵列端面抽运片状 Yb : YAG 晶体, 谐振腔采用 V 形有源镜构型, 实现了 1030 nm 红外激光输出。实验中分别测试了激光器在不同重复频率(1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz)条件下的激光输出特性。当输出耦合镜的反射率为 73%, 在抽运能量为 7.6 J (功率密度为 13 kW/cm²) 时, 1 Hz 重复频率输出稳定运行于 2.43 J, 光-光转换效率为 32%, 斜率效率为 54.5%; 10 Hz 重复频率输出稳定运行于 1.76 J, 光-光转换效率为 23.2%, 斜率效率为 43.3%。

关键词 激光器; Yb : YAG 晶体; 激光二极管阵列; 端面抽运; 重复频率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1831

High-Power Laser Diode End-Pumped Yb : YAG Repeat Frequency Laser

Jiang Dongbin Duan Wentao Xu Meijian Jiang Xinying Yu Haiwu Li Mingzhong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A 940 nm InGaAs laser diode (LD) array end-pumped Yb : YAG disk laser has been demonstrated, choosing V-shape stable resonator with active-mirror configuration. The infrared laser output at 1030 nm is obtained. The output performance of the laser under different repeat frequencies (1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz) is experimentally tested. With output mirror reflectivity of 73% and pump energy of 7.6 J (power of 13 kW/cm²), the output energy of 2.43 J is obtained with repeat frequency of 1 Hz, the optical-optical efficiency is 32% and the slope efficiency is 54.5%; the output energy of 1.76 J is obtained with repeat frequency of 10 Hz, the optical-optical efficiency is 23.2% and the slope efficiency is 43.3%.

Key words lasers; Yb : YAG crystal; laser diode array; end pump; repeat frequency

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)因具有高效率、高可靠性以及 LD 抽运源的长寿命等优点,正成为新一代固体激光器的主角。随着 LD 阵列输出功率的不断提高,需要高抽运强度的准三能级 Yb 激光介质受到了越来越多的重视,特别是上世纪 90 年代初 LD 抽运的 Yb 激光器室温运转以来,激光材料及器件的性能得到了广泛的研究。由于 Yb 离子特有的两多重态能级特性(抽运和激光跃迁发生于 Stark 子能级之间),不存在浓度猝灭、激发态吸收、上能级转换等不利因素,同时, Yb

激光介质普遍具有毫秒级的荧光寿命、宽的吸收谱,特别适合于功率受限的 LD 抽运^[1~3]。LD 抽运的 Yb 激光器大多运行于连续(CW)模式,或者高重复频率方式^[4~7],鲜见于低重复频率(数十赫兹以内)、长抽运脉宽的脉冲储能方式。目前基于 Yb 介质的 DPSSL,特别是大能量的脉冲储能装置同样得到了世界各大实验室的重视^[8~11],主要目的在于发展重复频率脉冲波(PW)系统的抽运源,以及惯性聚变能源(IFE)激光驱动器的研究平台。

考虑到此 Yb : YAG 的 DPSSL 实验平台将作为今后 100 J/10 Hz 的 DPSSL 级系统的前端,并作为放大器构形的可行性研究平台,采用了 LD 阵列

收稿日期: 2008-09-01; 收到修改稿日期: 2008-10-16

作者简介: 蒋东宾(1973-),男,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术研究。E-mail: jiangdb@tom.com

正面抽运的方式,“V”型平凹稳定腔,介质掺杂原子数分数为 10%,1.5 mm 厚。在不同工作频率与不同输出耦合镜的条件下,对 Yb:YAG 激光器的输出特性进行了实验研究。

2 实验装置

如图 1 和图 2 所示,整个实验装置由 LD 抽运源、抽运耦合系统以及激光谐振腔组成。抽运源采用德国 DILAS 公司的峰值功率为 12 kW(120 A 时)LD 阵列,工作中心波长为 940 nm,抽运脉冲宽度为 1 ms,谱线宽度为 4.6 nm;抽运耦合系统采用空心导管型耦合系统,耦合效率大于 90%,该耦合系统具有结构简单、耦合效率高、传输性能好等诸多特点^[12];激光谐振腔采用“V”型有源镜(Active Mirror,AM)构形平凹稳定腔^[13,14],使用掺杂原子数分数为 10%,厚度为 1.5 mm,口径为 $\phi 10$ mm 的 Yb:YAG 晶体片,正面抽运(抽运面积 $7\text{ mm} \times 6\text{ mm}$),背面水冷。激光介质前表面镀有对 940 nm 和 1030 nm 增透($T > 98\%$)的介质膜,背面镀有对 940 nm($R > 96\%$)和 1030 nm 高反($R > 99.8\%$)的介质膜,介质背面镀 940 nm 高反射膜,是为了提高抽运光的利用率。谐振腔的腔长为 43 cm,后腔全反镜(镀 1030 nm 高反膜)的曲率半径为 2 m,输出镜为镀 1030 nm 部分反射膜的平面镜。

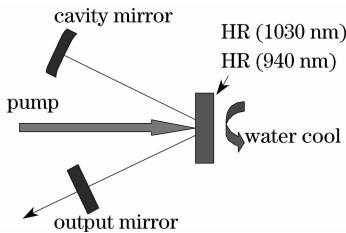


图 1 激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of laser system

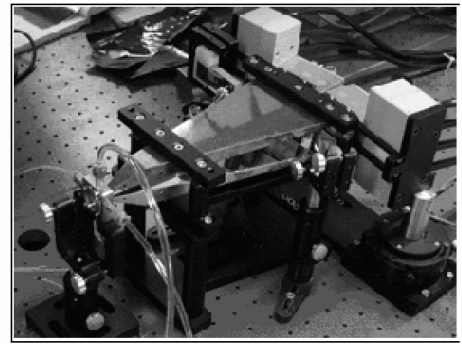


图 2 激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of laser system

3 实验结果及分析

首先对采用不同反射率的耦合输出镜时激光输出特性进行研究。在输出耦合镜反射率为 73% 时,输出激光能量为:1 Hz 工作时,激光能量输出为 2.43 J,斜率效率为 54.5%;10 Hz 工作时,激光能量输出为 1.76 J,斜率效率为 43.3%。此时 LD 阵列工作电流为 95 A,抽运峰值功率为 7.6 kW,实际耦合效率为 90%,介质表面峰值抽运功率密度约为 13 kW/cm^2 。表 1 与图 3 为不同反射率输出耦合镜时的输出能量及斜率效率。

表 1 不同反射率输出耦合镜时的输出能量、斜率效率及光-光转换效率

Table 1 Output energy, slope efficiency and optical-optical efficiency of the laser under different reffectivities

| Reffectivities /% | | 82 | 73 | 60 | 41.5 |
|----------------------------|-------|------|------|------|------|
| Output energy | 1 Hz | 2.45 | 2.43 | 2.3 | 1.6 |
| | 10 Hz | 1.63 | 1.76 | 1.6 | 0.83 |
| Slope efficiency | 1 Hz | 50.5 | 54.5 | 54.1 | 41.8 |
| | 10 Hz | 29.3 | 43.3 | 37.6 | 23.9 |
| Optical-optical efficiency | 1 Hz | 32.2 | 32 | 30.3 | 21.1 |
| | 10 Hz | 21.4 | 23.2 | 21.1 | 10.9 |

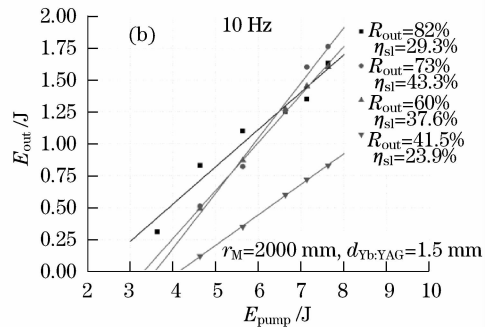
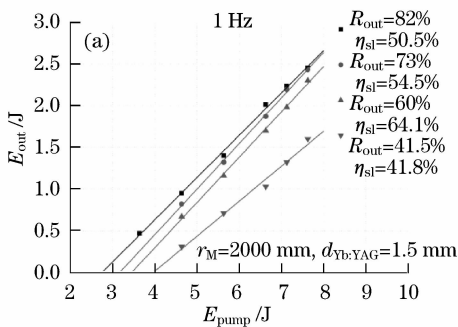


图 3 输出耦合镜不同反射率时的斜率效率

Fig. 3 Output energy and slope efficiency of the laser under different output mirror reffectivity

其次,开展了不同工作频率下激光器输出特性的研究。研究了输出耦合镜反射率为 82% 时,不同工作频率下的激光输出特性。表 2 与图 4 为激光器在不同工作频率下,介质表面峰值抽运功率密度约为 13 kW/cm^2 时的激光输出特性:

表 2 不同工作频率时的激光输出特性

Table 2 Output performance of the laser under different repeat frequency

| Frequency /Hz | 1 | 2 | 5 | 10 |
|--|------|------|------|------|
| Output energy E_{out}/J | 2.45 | 2.29 | 2.13 | 1.63 |
| Slope efficiency $\eta_{\text{sl}}/\%$ | 50.5 | 46.8 | 42.2 | 29.3 |
| Optical-optical efficiency $\eta_{\text{o-o}}/\%$ | 32.2 | 30.1 | 28 | 21.4 |

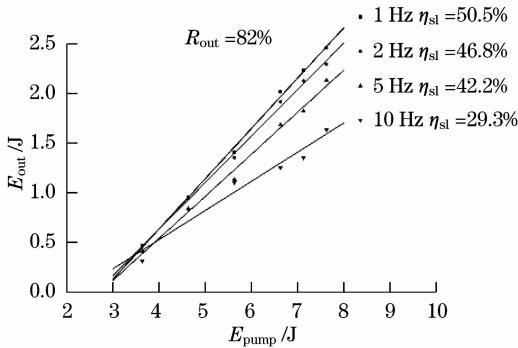


图 4 不同工作频率时的激光输出特性

Fig. 4 Output performance of the laser under different repeat frequency

在 LD 阵列输出峰值功率为 7.6 kW , 介质表面的抽运功率密度约为 13 kW/cm^2 , 实验表明当输出耦合镜的反射率为 73% 时, 激光器输出效率最佳。1 Hz 重复频率输出稳定运行于 2.43 J , 光-光转换效率为 32%, 斜率效率为 54.5%; 10 Hz 重复频率输出稳定运行于 1.76 J , 光-光转换效率为 23.2%, 斜率效率为 43.3%。由实验数据可以看出, 随着重复频率的增加, 激光输出能量随之下降, 主要是由于激光器在重复频率运转时, 激光介质内的热功率密度显著增大, 影响了激光能量的输出。这是准三能级 Yb 离子的共存特性, 因此基于 Yb 材料的放大器单元的高效热管理技术将是下一步工作的重点。

4 结 论

开展了低重复频率(1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz)、长抽运脉宽的脉冲储能型 Yb: YAG 激光器输出特

性的研究。输出耦合镜的最佳反射率为 73%, 在峰值抽运功率为 7.6 kW (功率密度为 13 kW/cm^2) 时, 获得了在重复频率 1 Hz 和 10 Hz 时的输出能量、光-光转换效率和斜率效率数据。在实验过程中, 激光二极管阵列输出并未达到满负荷状态, 因此, 随着抽运功率的增加, 激光器的输出能量还可进一步得到增加。

参 考 文 献

- 1 Yu Haiwu, Duan Wentao, Xu Meijian *et al.*. Review of ytterbium-doped laser materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(5): 30~41
於海武, 段文涛, 徐美健等. Yb 激光材料综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(5): 30~41
- 2 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Wavelength chirping of laser-diodes and optimization of diode-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2559~2569
於海武, 徐美健, 段文涛等. LD 波长啁啾效应与二极管泵浦固体激光器性能优化[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2559~2569
- 3 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Investigation on pumping dynamics and energy storage performances of Yb ions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 4158~4168
於海武, 徐美健, 段文涛等. Yb 离子泵浦动力学及储能特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 4158~4168
- 4 Li Lei, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. LD-pumped Yb: YAG chip laser with high beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1285~1288
李磊, 杨苏辉, 孙文峰等. 激光二极管抽运的高光束质量的 Yb: YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1285~1288
- 5 Liu Qiang, Gong Mali, Li Chen *et al.*. Corner-pumped Yb: YAG lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2): 721~725
柳强, 巩马理, 李晨等. 角抽运 Yb: YAG 激光器[J]. *物理学报*, 2005, **54**(2): 721~725
- 6 Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. QCW LD-pumped Yb: YAG microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 97~100
吴海生, 闫平, 巩马理等. 准连续激光二极管抽运的 Yb: YAG 微晶片激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 97~100
- 7 Chen Changshui, Zhang Qingli, Liu Weidong *et al.*. All-solid thin disk Yb: YAG laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(3): 307~309
陈长水, 张庆礼, 刘蔚东等. 全固化薄盘 Yb: YAG 激光器研究[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(3): 307~309
- 8 A. Bayramian. High average power laser program workshop [C]. Rochester NY, 2005
- 9 J. C. Chanteloup, H. W. Yu, G. Bourdet *et al.*. Overview of the Lucia laser program: towards 100 joules, nanosecond pulses, kW averaged power, based on ytterbium diode pumped solid state laser [C]. *SPIE*, 2005, **5707**: 105~116
- 10 H. W. Yu, G. Bourdet. Different cooling configurations for a high average power longitudinally diode-pumped Yb: YAG amplifier [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(24): 6205~6211
- 11 J. Hein, S. Podleska, M. Siebold *et al.*. Diode-pumped chirped pulse amplification to the joule level [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**: 419~422
- 12 Duan Wentao, Jiang Dongbin, Jiang Xuejun *et al.*. High power laser diode arrays end-pumped efficient coupling system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 51~55
段文涛, 蒋东滨, 蒋学军等. 高效大功率 LD 阵列端面抽运耦合系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 51~55

- 13 Duan Wentao, Xu Meijian, Yu Haiwu *et al.*. Experiments on output scaling and amplification of a novel active-mirror laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1367~1370
段文涛, 徐美健, 於海武 等. 一种新型有源镜激光器定标放大实验[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1367~1370
- 14 Xu Meijian, Yu Haiwu, Duan Wentao *et al.*. Output

performance of solid state heat capacity laser with active-mirror and dichromatic coatings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11):1775~1778
徐美健, 於海武, 段文涛 等. 双色膜 V 形有源镜结构的固体热容激光器输出特性[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11):1775~1778