

文章编号: 0258-7025(2010)01-0044-05

# 激光二极管端面抽运的焦耳级 10 Hz“V”型水冷 Yb:YAG 激光器

段文涛 蒋新颖 蒋东镔 郑建刚 李明中 於海武

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为研究激光二极管抽运的大能量重复频率 Yb:YAG 激光器的关键单元技术,建立了焦耳级 10 Hz“V”型有源镜(AM)构型 Yb:YAG 激光器。设计了一套空心导管抽运耦合系统,获得了 90%的抽运耦合效率。设计了水冷增益介质的热管理方案,10 Hz 自由振荡模式工作时获得 3.3 J 激光输出,光-光转换效率 27.5%,相对 1 Hz 重复频率工作(4.4 J)能量仅下降了 25%。对“正”、“背”面抽运两种构型的实验研究结果表明,“正”面抽运对介质热效应的抑制弱于“背”面抽运,与计算结果一致,但“正”面抽运效率高,无镀膜难题,更有利于工程化。

**关键词** 固体激光器; 激光二极管抽运; Yb:YAG 晶体; 热管理

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0044

## 10 Hz Joule-Class Laser Diode End-Pumped V-Shaped Water-Cooled Yb:YAG Oscillator

Duan Wentao Jiang Xinying Jiang Dongbin Zheng Jiangang Li Mingzhong Yu Haiwu

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

**Abstract** In order to study the key problems of rep-rated high power laser-diode-pumped Yb:YAG laser, a 10 Hz joule-class V-shaped water-cooled Yb:YAG oscillator with active mirror (AM) configuration is demonstrated. An efficient hollow duct coupling system for 12 kW LD was designed and the coupling efficiency is 90%. 3.3 J / 10 Hz output energy with 27.5% optical-optical efficiency has been achieved in free running regime, which shows that the thermal effects within the Yb:YAG crystal are well managed by the cooling system of the laser head compared with 4.4 J / 1 Hz output energy. The experimental results about two kinds of pumping architectures show that the front-pumped architecture is less effective to decrease the average temperature and its gradient within the gain medium than the rear-pumped architecture which accords basically with our prediction, but the front-pumped is more efficient and has no dichromatic coating issues which are helpful to be implemented easily.

**Key words** solid-state laser; laser-diode-pumped; Yb:YAG crystal; thermal management

### 1 引 言

20 世纪 90 年代以来,得益于高功率 InGaAs (900~980 nm)激光二极管(LD)的发展及价格的日趋降低,中心吸收谱在 940 nm 附近的 Yb 离子的激光性能得到了广泛的研究。Yb 离子能级结构简单,电子构型为  $4f^{13}$ , 仅有一个基态  $^2F_{7/2}$  和一个激发态  $^2F_{5/2}$ , 抽运和激光跃迁发生于基态和激发态 Stark 分裂子能级之间,与 Nd 离子相比,不存在浓度猝灭、激发态吸收、上能级转换等不利因素,而且 Yb 介质的长荧光寿命更有利于储能。然而在室温

下 Yb 离子属于准三能级结构,抽运饱和强度很高,为获得高的系统效率,需要较高的抽运强度,目前常见 LD 阵列发光强度仅  $1 \text{ kW} / \text{cm}^2$  量级,而常温下脉冲储能器所需抽运强度高达  $10 \sim 20 \text{ kW} / \text{cm}^2$  以上,因此如何实现 LD 抽运光的高效耦合是 Yb 激光系统需解决的关键技术之一;而且由于 Yb 离子的激光下能级有一定的热布居数(服从玻尔兹曼热分布),激光性能对介质的温度十分敏感,这又对重复频率高强度抽运下的增益介质热管理技术提出挑战。

目前,国内对 Yb 激光器的研究主要在超短脉冲

收稿日期: 2009-02-12; 收到修改稿日期: 2009-04-08

作者简介: 段文涛(1982—),男,研究实习员,主要从事高功率固体激光器方面的研究工作。E-mail: mofeie@126.com

产生、宽带调谐和连续运转的高平均功率激光器等方面<sup>[1~4]</sup>,而关于重复频率脉冲储能器件的研究报道较少<sup>[5]</sup>。美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)、德国 Jena 大学、法国 Luli 实验室分别采用 Yb:SFAP, Yb:FP-glass, Yb:YAG 等激光介质建立 Mercury, Polaris, Lucia 等纳秒级重复频率大能量(100 J 级)的激光装置<sup>[6~8]</sup>,以开展惯性聚变能(IFE)基础预先研究和重复频率脉冲波(PW)抽运源技术研究。本文利用峰值功率 12 kW 的 LD 阵列和 Yb:YAG 晶体,建立了 10 Hz 焦耳级端面抽运 Yb:YAG 激光器实验平台,为下阶段 100 J 级重复频率(10 Hz)脉冲 Yb:YAG 激光器探索关键技术,也为开展 IFE 激光驱动器技术基础研究和为未来重复频率 PW 项目的抽运源探索新的技术途径。

## 2 实验装置

激光器由 LD 抽运源、抽运光耦合系统、激光头和谐振腔组成。增益介质为  $\phi 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,掺杂原子数分数为 5% 的 Yb:YAG 晶体。抽运源为 DILAS 公司生产的 QCW InGaAs 激光二极管阵列,室温下驱动电流 120 A,脉冲宽度与 Yb:YAG 上能级寿命(1 ms)匹配,中心波长为 940 nm,谱线宽度 3 nm[半峰全宽(FWHM)],快轴准直后发散角  $0.6^\circ$ (FWHM),慢轴发散角  $7.5^\circ$ (FWHM)。抽运源共两个模块,每个模块有两个 LD 子阵列,总峰值功率 12 kW,最大重复频率 10 Hz,占空比 1%。为实现对 Yb:YAG 晶体的高强度抽运,设计了一套空心导管型的抽运耦合系统<sup>[9]</sup>,如图 1 所示。

该耦合系统由两块半径 181 mm 的矩形透镜和两块长 300 mm 的镀银不锈钢反射镜组成,抽运光斑为 7 mm(快轴)  $\times$  6 mm(慢轴)。LD 阵列快轴方向的光线用透镜汇聚,同时将两模块偏转主光轴  $7^\circ$ ,使二

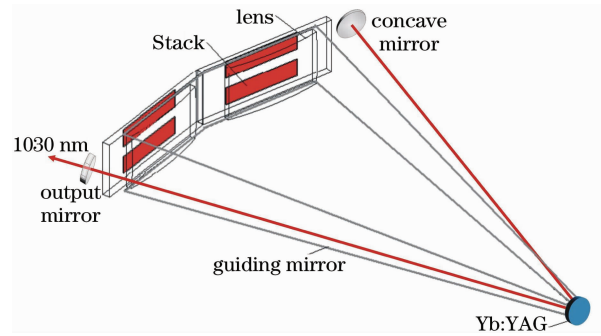


图 1 抽运耦合系统

Fig. 1 Pumping delivery system

者汇聚的抽运光斑在晶体表面叠加;慢轴方向的光线用银反射镜传导汇聚,银膜表面涂覆  $\text{SiO}_2$  保护膜以防氧化,用不锈钢做基底抛光镀膜效果较好,且硬度强,热导率高,不易形变,抽运光沉积在基底的废热自然冷却即可不会变形破坏镜面。我们设计了两种端面抽运结构——“正”面抽运和“背”面抽运,如图 2 所示,以研究不同抽运结构对激光器输出能力的影响。图 2(a)为“正”面抽运结构示意图,抽运光与激光在介质同一侧,从介质“正”面抽运,“背”面冷却,“正”面镀抽运光(940 nm)和激光(1030 nm)增透介质膜,“背”面镀 940 nm 和 1030 nm 高反射介质膜。“背”面抽运结构示意图如图 2(b)所示,抽运光和激光在介质两侧,从介质“背”面抽运,“背”面冷却,这种结构需在介质同一面镀膜性相反的双色膜,对于这种抽运波长(940 nm)与激光波长(1030 nm)间隔仅 90 nm 的双波长膜,目前镀膜技术实现起来难度大,且成本较高,因此我们在晶体“背”面镀 940 nm 增透膜和 1030 nm 高反射膜,而在“正”面只镀 1030 nm 增透膜,无 940 nm 反射膜。激光提取方式采用提取效率更高的“V”型有源镜(Active mirror, AM)构型<sup>[10]</sup>,平凹稳定腔,后腔镜为半径 2 m 的凹面全反射镜,输出镜反射率为 82%,激光提取夹角  $20^\circ$ 。

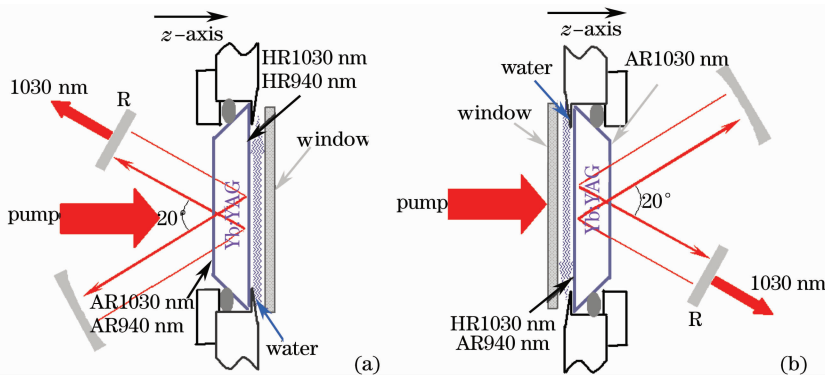


图 2 不同抽运结构示意图。(a)“正”面抽运;(b)“背”面抽运

Fig. 2 Schematic diagrams of different pumping architecture. (a) Front face pumped; (b) rear face pumped

### 3 增益介质的热管理

由于室温下 Yb:YAG 具有很高的抽运饱和通量 ( $28 \text{ kW/cm}^2$ ), 因此要实现系统较高效率必须采用强抽运, 虽然 Yb:YAG 介质的抽运光转换成激光的量子效率高达 91%, 但强抽运 10 Hz 重复频率运行时增益介质中仍然存在很强的热负载。对于 Yb 离子这种准三能级结构增益介质, 激光下能级固有的热布居导致激光器对介质温度非常敏感, 因此对 Yb:YAG 增益介质的高效热管理是保证该激光器 10 Hz 重复频率稳定高效运行的关键。基于以前的实验研究结果<sup>[1]</sup>, 我们对激光头做了改进设计, 结构如图 3 所示。激光头有 3 个进水口, 3 个出水口, 致冷水从封水窗口和 Yb:YAG 晶体间 1 mm 间隙中高速流过以带走介质中的沉积废热, 致冷水流向

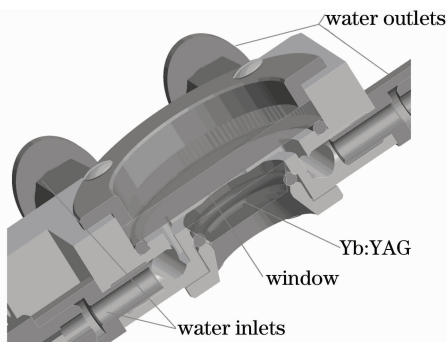


图 3 激光头结构

Fig. 3 Cutway view of the laser head

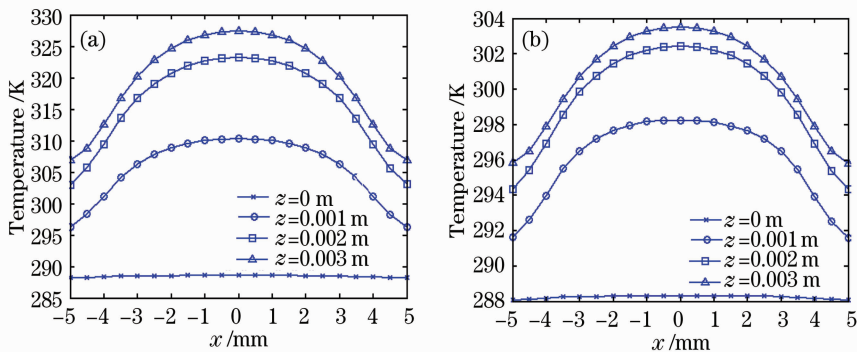


图 5 Yb:YAG 晶体中的横向热分布。(a)“正”面抽运; (b)“背”面抽运

Fig. 5 Transverse temperature distribution within the Yb:YAG crystal. (a) Front face pumped; (b) rear face pumped

### 4 实验结果与讨论

根据以上设计参数, 完成了抽运耦合系统及激光头加工, 搭建 Yb:YAG 激光器实验平台。对该激光器进行了抽运耦合实验, 图 6 为用成像法测得的晶体表面的抽运场分布, 抽运光斑大小约  $7.5 \text{ mm}$  (快轴)  $\times 6.25 \text{ mm}$  (慢轴), 与设计值相符, 此区域内抽运光为总能量的 90%, 即系统耦合效率达 90%, 由

示意图如图 4 所示。

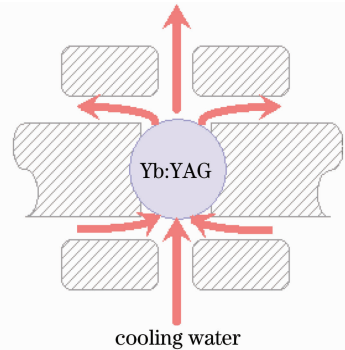


图 4 激光头水流示意图

Fig. 4 Scheme of the water flow in the laser head

经测试, 该激光头致冷水流量达  $55 \text{ mL/s}$ , 用有限元软件 ANSYS 结合流体力学软件 FLUENT 对该结构热管理效果进行模拟计算, 当致冷水温度为 288 K 时, 介质冷却面的换热系数高达  $10^4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  量级, 抽运强度为  $25 \text{ kW/cm}^2$ , 激光器 10 Hz 运行时, 两种抽运结构下介质纵向不同位置处的横向温度分布如图 5 所示。如图 5(a), “正”面抽运时, 介质中最大横向温差为 17 K, 介质前后表面温差为 40 K; 而“背”面抽运时 [如图 5(b)], 介质中最大横向温差仅 8 K, 介质前后表面温差也仅 16 K。计算结果表明, “背”面抽运时, 介质平均温升和横纵向温差均小于“正”面抽运结构, “背”面抽运的热管理效果更佳。

此可推知, 12 kW LD 阵列 120 A 电流驱动时, 晶体上的峰值抽运光强高达  $23 \text{ kW/cm}^2$ , 电流脉冲宽度 1 ms 时, 晶体表面能量密度为  $23 \text{ J/cm}^2$ 。

实验研究了这种水冷 Yb:YAG 激光器在两种端面抽运结构下的不同频率工作时的激光自由振荡输出性能, 结果如图 7 所示。图 7(a) 是“正”面抽运 1 Hz, 5 Hz 和 10 Hz 重复频率时激光输出能量随抽

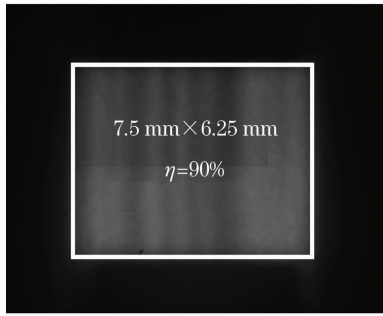
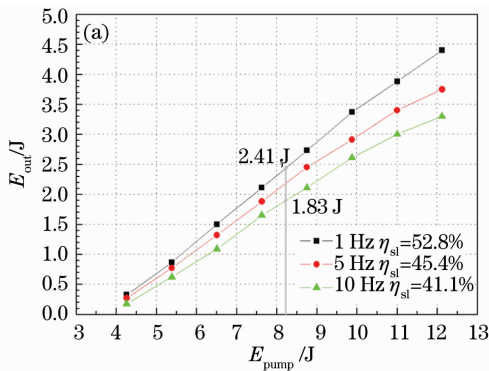


图 6 晶体表面的抽运光斑分布

Fig. 6 Pump distribution on the front face of Yb:YAG 运光的变化曲线,由图可知激光器 1 Hz 和 10 Hz 重复频率工作的斜率效率分别 52.8%,41.1%,12 J 抽运光注入时,输出能量为 4.4 J 和 3.3 J,对应光-光转换效率为 36.7%和 27.5%。图 7(b)为“背”面抽运下不同频率时的激光输出变化曲线,1 Hz 和 10 Hz 重复频率工作时斜率效率分别为 33.4%和 27.2%,12 J 抽运光注入时激光输出分别为 2.41 J 和 1.91 J。

实验结果表明,“正”、“背”面抽运方案中,随着抽运强度的增强和激光器工作频率的提高,激光输出能量损耗均随之增加。主要原因是介质温升使激光下能级热布居数增加及热畸变等所致的热效应影响降低了系统效率,但激光输出斜率效率都随着抽运强度的增加和重复频率的降低呈线性增长趋势,这说明,激光头目前的水冷结构满足激光器重复频率工作时



增益介质的热管理需要,而且具有一定的定标放大潜力。对比两种抽运方式的实验结果,相同条件下“正”面抽运的激光输出能量及效率均大于“背”面抽运,这是因为“背”面抽运晶体激光提取面未镀膜 940 nm 反射膜,抽运光强  $23 \text{ kW/cm}^2$  时约 16%的抽运光未被吸收,而且此结构中抽运光经窗口、致冷水后入射至晶体,在传输过程中抽运光被损耗和弥散从而降低了增益介质上的抽运强度,这些因素导致系统抽运光利用效率较低,影响了系统输出性能。12 J/10 Hz 抽运时,“正”、“背”面抽运的激光输出能量相对 1 Hz 运行时分别下降了 25%和 20.7%,但这无法证明“背”面抽运的热管理效果优于“正”面抽运,以上实验结果可推知 1 Hz 运行时热效应对激光输出的影响可以忽略,则两抽运方式 1 Hz 输出均为 2.41 J 时,10 Hz 时“正”、“背”面抽运激光输出分别是 1.83 J 和 1.91 J,相应的能量下降率为 24.1%和 20.7%,从考察增益介质重复频率热管理效果的角度看,该激光器“背”面抽运对增益介质重复频率热管理效果优于“正”面抽运,与模拟计算结果一致;而这种差别的根本原因在于“背”面抽运结构里增益介质中高热沉积层与冷却层共面,结合激光头水冷结构较强的热交换能力,Yb:YAG介质的热管理效率得以提高,而“正”面抽运晶体中低热沉积层与冷却层共面,增大了介质横纵向温差和平均温升,加剧了热效应影响。

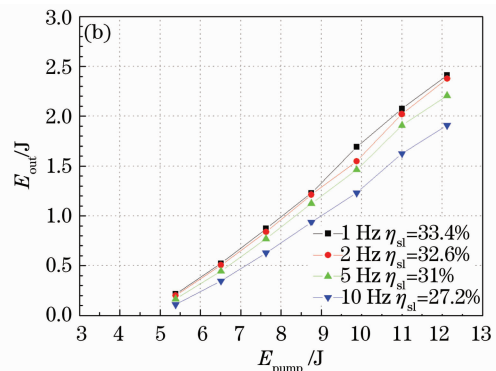


图 7 激光器输入输出能量曲线。(a)“正”面抽运;(b)“背”面抽运

Fig. 7 Output energy versus pump energy. (a) Front face pumped; (b) rear face pumped

## 5 结 论

研究了 LD 抽运的“V”型高效水冷 Yb:YAG 激光器及其自由振荡条件下的输出性能。设计了高效抽运耦合系统,获得了 90%的耦合传输效率。激光头的水冷热管理结构有效控制了系统热效应,10 Hz 最高激光输出 3.3 J,斜率效率 41%,光-光转换效率达 27.5%。实验结果表明,“背”面抽运对

Yb:YAG 晶体热管理效果优于“正”面抽运,与计算结果相符,但抽运光利用率低,系统效率低,且介质表面镀膜性相反的双波长膜层难度较大;而“正”面抽运系统效率高,无镀膜难题,更有利于工程化。目前的水冷结构能够满足“正”面抽运结构的增益介质重复频率热管理要求,且具有满足更大口径增益介质热管理要求的潜力,因此目前“正”面抽运是激光

器及放大器抽运结构的最佳选择。

### 参 考 文 献

- 1 Guo Kai, Song Yanrong, Tian Jinrong *et al.*. Tunable laser characteristics of three Yb<sup>3+</sup>-doped crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1289~1292  
郭凯, 宋晏蓉, 田金荣等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 晶体宽带可调谐激光输出特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1289~1292
- 2 Li Chunyu, Li Gang, Chen Meng. Ultrashort pulses compression with four prisms system in plane-parallel oscillator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(Suppl.): 102~105  
李春宇, 李港, 陈檬. 四棱镜系统压缩 LD 端泵 Yb:YAG 皮秒脉冲的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 102~105
- 3 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
- 4 Qi Yunfeng, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. 10.5 W continuous-wave output from Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic disk laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 797~798  
漆云凤, 楼祺洪, 董景星等. Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄片激光器获得 10.5 W 连续激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 797~798
- 5 Li Jindong, Li Xiaoli, Lu Yutian *et al.*. Laser-diode side-pumped Yb:YAG slab laser with microchannels heat sink[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 289~292  
李劲东, 李小莉, 陆雨田等. 双侧面 90° 抽运微通道致冷 Yb:YAG 板条激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 289~292
- 6 A. Bayramian. Status of the mercury laser[R]. High Average Power Laser Program Workshop, 2005
- 7 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
- 8 J. C. Chanteloup, H. 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
- 9 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, 蒋东宾, 蒋学君等. 高效大功率激光二极管阵列端面抽运耦合系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 51~55
- 10 Duan Wentao, Yu Haiwu, Xu Meijian *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, 於海武, 徐美健等. 一种新型有源激光器定标放大实验[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1367~1370
- 11 Jiang Dongbin, Duan Wentao, Xu Meijian *et al.*. High-power laser diode end-pumped Yb:YAG repeat frequency laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1831~1834  
蒋东宾, 段文涛, 徐美健等. 高功率激光二极管端面抽运的重复频率 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1831~1834