

文章编号: 0258-7025(2009)01-0056-03

双热焦距激光热近非稳腔系统

高宏伟¹ 彭钦军¹ 崔前进¹ 李平² 鲁远甫¹ 许家林¹ 徐一汀¹ 崔大复¹ 许祖彦¹

(¹ 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; ² 济南钢铁集团总公司装备部, 山东 济南 250010)

摘要 多热焦距激光谐振腔与单热焦距谐振腔相比, 具有结构灵活、热管理简便等优点, 然而其热稳定性受到激光头分布等因素影响, 需要优化设计以实现多热焦距激光谐振腔高功率稳定输出。理论分析了激光头分布对多热焦距激光谐振腔热稳定性的影响, 对比了单热焦距双棒谐振腔、双热焦距 3 棒对称谐振腔和双热焦距 3 棒非对称谐振腔的热稳定性。根据理论分析, 采用不同热焦距的激光头构成双热焦距 3 棒串接对称热近非稳腔, 通过优化设计, 当抽运功率为 3480 W 时, 该连续波 1064 nm Nd:YAG 激光系统获得稳定输出, 最高输出功率达 1125 W, 光-光转换效率达 32%, 光束质量约 15 mm·mrad。

关键词 激光技术; 固体激光; 热焦距; 三棒串接

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0056

Double Focus Thermally-Near-Unstable Resonator Laser

Gao Hongwei¹ Peng Qinjun¹ Cui Qianjin¹ Li Ping²

Lu Yuanfu¹ Xu Jialin¹ Xu Yiting¹ Cui Dafu¹ Xu Zuyan¹

(¹ Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
² The Equipment Office of Jinan Steel Company, Jinan, Shandong 250010, China)

Abstract The structure and thermal management of many-heat focus resonator is more flexible than that of single heat focus resonator. Whereas, the stability of many-thermal focus resonator is affected by more factors, such as the arranging of laser head, which need optimizing design. To get stability output, the single focus double rod resonator, the double focus 3 rod symmetrical resonator and the double focus 3 rod laser with unsymmetrical cavity are analyzed and compared. With the theoretic results, by mounting three laser heads with two thermal focus into a flat-flat symmetrical thermally-near-unstable resonator, a continuous-wave power stabilized output of 1125 W at 1064 nm is obtained with a optical-optical conversion efficiency of 32% and a beam quality of 15 mm·mrad under the pumping power of 3480 W.

Key words laser technique; solid-state laser; thermal focus; three-rod

1 引言

全固态激光(DPL)是利用大功率半导体激光器抽运固体激光材料获得激光输出的一种先进激光源。高功率高光束质量 DPL 是 DPL 技术发展的重要方向, 在先进制造、能源、国防和科学研究的升级换代和新品开发中具有重要的应用前景^[1~3]。多激光头串接是获得高功率高光束质量 DPL 输出的重用方法之一。当 N 个激光头串接在谐振腔内时, 通过合理设计谐振腔结构, 可以使激光系统比采用单

激光头系统的输出功率提高 N 倍, 同时保持光束质量与使用单个激光头的谐振腔基本相同^[4]。由于单热焦距串接谐振腔具有结构简单、稳定性高等优点, 因此受到了广泛关注。然而, 为了获得相同的热焦距, 激光谐振腔要求每个激光头具有相同的抽运功率、抽运结构、激光晶体长度、掺杂浓度、热管理方式和能力等, 即每个激光头的各项参数和热管理等要求完全相同, 这使得系统的设计和应用不灵活^[5~11]。多热焦距激光谐振腔中, 激光头可具有不

收稿日期: 2008-03-06; 收到修改稿日期: 2008-04-11

基金项目: 国家 863 计划(2006AA030102)资助项目。

作者简介: 高宏伟(1978—), 男, 博士后, 目前研究方向为全固态激光器。E-mail: Ghw831@163.com

导师简介: 许祖彦(1940—), 男, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 目前主要研究方向为全固态激光器。

同的热焦距,采用不同的激光棒、抽运功率和热管理方式等,因此应用更加灵活多样。

本文利用光束传播矩阵理论,对不同热焦距和不同的激光头分布对系统热稳定性的影响进行了分析和对比。根据理论分析,采用多热焦距激光头的谐振腔,通过优化设计激光谐振腔结构,克服了多热焦距激光系统中各激光头热透镜焦距大小和热致双折射效应等不同对系统稳定性产生的影响,实现系统稳定输出,同时该系统具有谐振腔结构、热管理方式和能力灵活等优点。最终研制了千瓦级双热焦距3棒串接对称腔 DPL 系统。

2 理论分析

首先对三种激光谐振腔的热稳定性进行分析对比。图 1(a)所示为单热焦距双棒对称谐振腔,系统采用平平对称谐振腔结构,由两个结构和参数完全相同的激光头 A 和 B 构成,可近似认为两激光头具有相同的热焦距,即构成单热焦距谐振腔。激光头 A 中,激光晶体采用 $\phi 7 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 激光棒,晶体中 Nd 离子的粒子数分数为 0.7%,使用 110 个 20 W 的激光二极管阵列做抽运源,最大抽运功率约为 2200 W,其输入输出关系如图 2(a)所示。图 1(b)所示为双热焦距非对称 3 棒谐振腔,其中激光头 A 与图 1(a)系统中的相同。由于激光头 C 和 D 都采用 $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 激光棒,50 个 20 W 的激光二极管阵列做抽运源,Nd 离子粒子数分数为 0.7%,因此可近似认为激光头 C

和 D 具有相同的热透镜焦距,其输入输出关系如图 2(b)所示。谐振腔中,由于激光头 C 和 D 与激光头 A 的激光晶体长度、热管理能力及抽运功率等不同,因此可近似认为系统具有两个不同热透镜焦距,各激光头按热焦距以非对称方式排列。图 1(c)所示为双热焦距对称 3 棒谐振腔,采用的各激光头与图 1(b)所示的谐振腔相同,各激光头按热焦距对称分布。

图 2 所示为 A、C 和 D 激光头分别采用高反镜和 30% 输出镜构成激光系统的 1064 nm 功率输出曲线图。由图 2 可知,当 A、C 和 D 激光系统的抽运功率分别为 2024 W,800 W 和 840 W 时,获得最大输出功率为 575 W,226 W 和 269 W,相应的光-光转换效率分别为 28.4%,28.2% 和 32.1%。

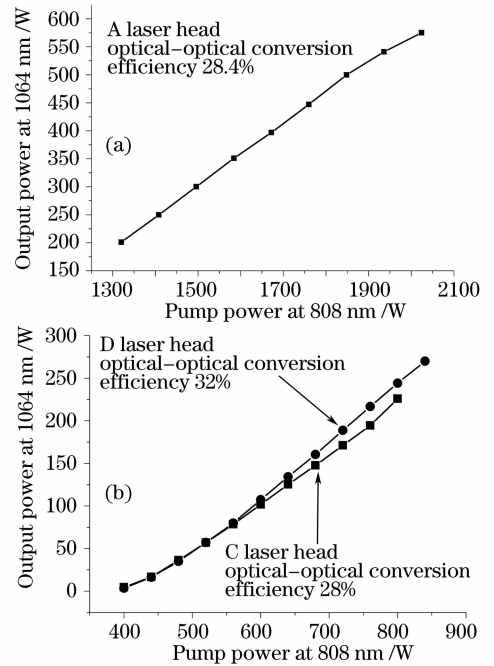


图 2 输出功率与 808 nm 抽运功率的关系。

(a) 激光头 A; (b) 激光头 C 和 D

Fig. 2 Output laser power at different pump powers.

(a) A laser head; (b) C and D laser head

根据 ABCD 方法,分别计算了图 1 所示的三种谐振腔中激光头 A 内光斑直径随热透镜焦距的变化曲线,以此来分析系统的热稳定性。如图 3 所示,单热焦距双棒谐振腔(WR1 线)与 3 棒双热焦距对称谐振腔(WR3 线),尽管两个谐振腔内热焦距数量和大小不同,但通过优化系统结果,可使 3 棒双热焦距对称谐振腔具有与单热焦距双棒谐振腔相近的热稳定性;同时,3 棒双热焦距对称谐振腔与 3 棒双热焦距非对称谐振腔(WR2 线)相比,尽管两谐振腔内

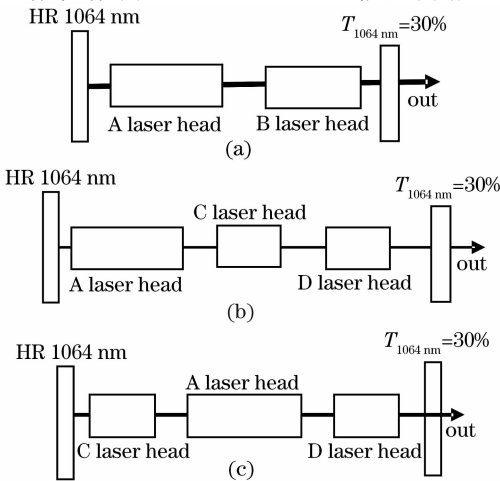


图 1 (a) 单热焦距双棒谐振腔; (b) 双热焦距 3 棒

非对称分布谐振腔; (c) 双热焦距 3 棒对称分布谐振腔

Fig. 1 (a) Single focus double rod resonator; (b) double

focus 3 rod unsymmetrical resonator; (c) double

focus 3 rod symmetrical resonator

热焦距数量和大小相同,但由于谐振腔内热透镜分布对称性的不同,使得系统谐振腔稳区特性完全不同。3棒双热焦距非对称谐振腔具有多个分离的热稳区,热稳区间存在非稳区域。在第一个热稳区内,随抽运功率增加,当热焦距接近260 mm时,谐振腔趋于非稳,输出功率下降,谐振腔输出功率较低。而对于优化系统结构的3棒双热焦距对称谐振腔,它具有连续的热稳区,且只有当热透镜焦距小于100 mm时,谐振腔才趋于非稳。

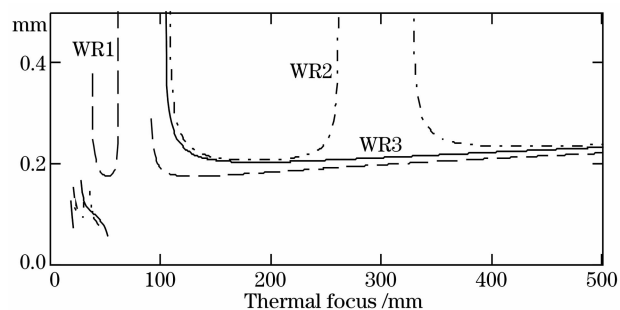


图3 激光谐振腔稳定性示意图

Fig. 3 Stability of laser cavity

3 实验结果

根据理论分析,采用如图1(c)所示的3棒双热焦距平平对称谐振腔结构,并通过优化设计激光头与腔镜及激光头间的距离构成热近非稳腔,使得激光器工作于稳定曲线边缘,利用激光介质的自限模作用获得大的基模体积,从而得到较好的光束质量。其激光输出功率如图4中方块所示,当总的抽运功率为3480 W时,该1064 nm Nd:YAG激光系统最高输出功率为1125 W,光-光转换效率达32%,光束质量约15 mm·mrad,随着抽运功率的进一步增加,系统进入非稳区,功率下降,系统实现最优化。

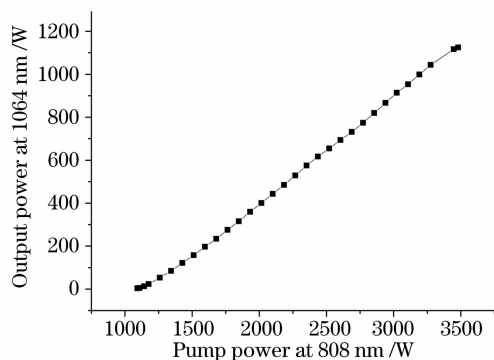


图4 1064 nm 激光输出功率与808 nm 抽运功率的关系

Fig. 4 Output laser power at 1064 nm versus 808 nm pump power

4 结 论

对双热焦距千瓦级激光热近非稳腔中激光头分布的对称性与系统稳定性的关系进行了理论分析和对比。根据理论分析,通过优化设计系统内激光头的分布,并根据多热透镜焦距设计激光谐振腔结构等技术途径,研制了千瓦级双热焦距3棒串接对称腔DPL系统。与双棒单热焦距对称谐振腔相比,3棒双热焦距平平对称谐振腔可以灵活设计各激光头的激光晶体尺寸、热管理方式、抽运方式和抽运功率等各种参数,同时由于采用激光棒数目增加,减小了单台激光头的热效应,使得输出光束质量好,并在更大的抽运功率下才进入热非稳区。

参 考 文 献

- Chen Yihong, Su Yong. Study of high-power laser diode-pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (Suppl.): 319~321
陈义红, 苏勇. 大功率激光二极管抽运固体激光器的研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(增刊): 319~321
- Degang Xu, Yuyue Wang, Haifeng Li *et al.*. 104 W high stability green laser generation by using diode laser pumped intracavity frequency doubling Q-switched composite ceramic Nd:YAG laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3991~3997
- 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
- K. P. Driedger, R. M. Iffländer, H. Weber. Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(4): 665~674
- Wang Hailin, Zhou Zhuoyou, Cao Hongbing *et al.*. Study on the stable characteristic of two-rod Nd:YAG laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 149~152
王海林, 周卓尤, 曹红兵等. 双棒串接Nd:YAG激光器的稳定性研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(2): 149~152
- Hyun Su Kim, Jin-Tae Kim, Jong Rak Park. Stable range enhancement in a symmetric confocal two-rod resonator with 90° optical rotator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39** (12): 1594~1599
- Sungman Lee, Mijeong Yun, Byung Heon Cha *et al.*. Stability analysis of a diode-pumped, thermal birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser with 770-W output power [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5625~5631
- Bo Yong, Geng Aicong, Bi Yong *et al.*. 1.15 kW continuous-wave generation by diode-side-pumped two-rod Nd:YAG laser [J]. *Chinese Physics*, 2005, **14**(4): 771~773
- Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd:YAG rods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1483~1487
刘崇, 葛剑虹, 项震等. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- Hu Chunhua, Bi Yong, Sun Zhipei *et al.*. Laser-diode pumped 500 W continuous-wave Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 13~15
胡春华, 毕勇, 孙志培等. 连续波500 W全固态Nd:YAG激光器研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 13~15
- W. Koehner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 237~250
W. 克希耐尔. *固体激光工程* [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 237~250