

文章编号: 0258-7025(2010)11-2807-03

输出功率 11 kW 的高功率固体板条 激光器介质热分析

王超 唐晓军 徐盛婧 刘磊 梁兴波 刘刚 杜涛 赵鸿 陈三斌

(华北光电技术研究所固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要 为研制高功率的板条功率放大模块,对 Nd:YAG 板条激光器的增益介质的热结构进行了研究。采用有限元方法仿真了高功率激光二极管阵列端面抽运 Nd:YAG 板条介质的温度、应力分布,数值模型考虑了抽运光在介质内的不均匀分布。结果表明,板条介质掺杂和未掺杂结合部位温度和应力最高,是整个板条介质的薄弱环节,应优化设计避免板条破裂。以此为参考设计高功率放大模块,而后搭建激光放大链路,种子光功率 2.5 W,通过一级预放模块四程放大后,再经过四级功放模块双程放大,实现了 11 kW 激光输出。实验中测量了高功率抽运条件下增益介质的温度分布,与数值仿真结果基本符合。

关键词 激光器;高功率固体激光器;Nd:YAG 板条激光器;热效应

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2807

Investigation on Thermal Effect of High Power Slab Laser with 11 kW

Wang Chao Tang Xiaojun Xu Liujing Liu Lei Liang Xingbo

Liu Gang Du Tao Zhao Hong Chen Sanbin

(National Key Laboratory of Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics,
Beijing 100015, China)

Abstract Thermal effect of Nd:YAG slab gain medium is studied for solid slab high power amplifier. The investigation uses the finite element method to simulate the distribution of temperature and stress of Nd:YAG slab gain medium with edge pump by high power laser diode array, considering uneven pump distribution in gain medium. The result shows that the temperature and stress of the bonding part of doped and undoped YAG are the highest. It is the weakness of the slab gain medium and should be designed optimum for avoiding slab Nd:YAG damage. Refer to the result, the power amplifier is designed. The laser chain is built, and the seed laser of 2.5 W power is amplified by a four-pass pre-amplifier and four stage double-pass power amplifier. The laser chain achieves 11 kW laser average power. The temperature distribution of slab gain medium with high power pump is measured in the experiment. The experimental result agrees well with the simulation.

Key words lasers; high power solid laser; Nd:YAG slab laser; thermal effect

1 引言

采用激光二极管(LD)抽运的固体激光器,具有效率高、光束质量好、体积小和重量轻等优点,尤其它是一种电驱动的激光器,使用成本和维护的复杂性较低,在工业领域的应用前景非常广阔。固体增益介质的热效应一直是限制固体激光器功率提高和光束质量改善的重要因素^[1]。近年来,随着 LD 抽运固体激

光器技术的发展,高功率固体激光器技术的研究呈现出多种技术路线同时发展的情况,并且都取得了显著的进展。现在国际上高功率固体激光器的研究主要有:固体热容激光器^[2~6]、板条激光主振荡功率放大器(MOPA)放大链路相干合成、薄片激光器、光纤激光器^[1]等方案。这几种方案在激光介质热管理方面都很好地解决了热效应降低光束质量的问题。

收稿日期: 2009-12-10; 收到修改稿日期: 2010-04-01

作者简介: 王超(1978—),男,博士,高级工程师,主要从事激光二极管抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: chaowangcn@126.com

其中板条增益介质采用薄板条大面积传导冷却、“之”字形光路技术,保证了固体增益介质的有效冷却并克服其热效应对激光光束质量造成的不良影响,可以作为高平均功率、高光束质量激光器的优良增益介质^[7~9]。2009年, Northrop Grumman 公司宣布其板条固体激光器系统已经超过 100 kW 的门槛,由 7 个 15 kW 链路组成的系统,相干合成输出实现 105 kW,运行时间超过 5 min,电光效率 19.3%,激光系统开机达到满功率的时间小于 0.6 s,光束质量(BQ)优于 3^[10],由此可以证明板条激光器具有作为高功率激光器的潜力。

端面抽运的板条增益介质的优点是抽运光吸收路径长,吸收效率高,但是如果设计不合理,在抽运方向上可能会产生大的温度梯度,导致介质出现大的热应力造成介质的破坏,因此必须对激光介质的温度和应力进行详细的分析。现阶段有限元软件被大量使用来进行激光介质的热效应分析^[11,12]。

本文重点研究了板条增益介质在不同抽运条件下的热结构。采用有限元软件 ANSYS 对介质热分布进行仿真,并给出了激光器放大链路的实验结果。

2 数值仿真

板条增益放大模块对种子光的高增益放大能力是实现激光器高平均功率输出的基础,因此必须分析激光增益介质在高功率抽运条件下的热分布情况。如图 1 所示,激光功率放大模块采用 LD 阵列双端对称端面抽运 Nd:YAG 板条的方式,采用两端键合不掺杂 YAG 的复合晶体作为增益介质,采用传导冷却的方式,使用铜质微通道热沉与板条的两个大的侧面紧密接触保证有效冷却。被放大激光在板条内为“之”字形光路,可有效克服该方向上的热

效应对光束质量的不良影响。

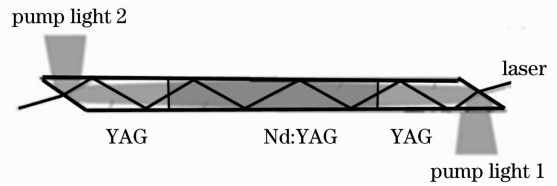


图 1 放大模块抽运和激光器光路示意图

Fig. 1 Pumping and laser optical path of amplification model

采用 ANSYS 有限元分析软件基于固体的瞬态热传导微分方程和弹性力学的基本方程,对 Nd:YAG 板条进行模拟仿真。取介质中心位置为 z 轴坐标原点,根据介质对抽运光的吸收公式可以得到介质的内热源分布方程

$$q_v(x, y, z) = \eta I(x, y) \alpha \{ \exp[-\alpha(l/2 + z)] + \exp[-\alpha(l/2 - z)] \}, \quad (1)$$

式中 η 为抽运光的产热系数, $I(x, y)$ 为介质表面的抽运光分布, α 为介质的吸收系数, l 为掺杂增益介质长度。

从图 2 中可以看出,板条最热的部分是板条掺杂晶体和未掺杂晶体的端面附近,最高温度为 98°,在注入热功率为 5000 W 时的计算结果。其等效应力的最大值也在键合面附近。这是因为计算增益介质的产热是按照增益介质对抽运光的吸收函数来计算的,未掺杂的晶体不吸收抽运光,增益介质吸收抽运光产热集中在键合端面附近。键合的位置是增益介质中承受应力最弱的部分,所以要特别注意键合面附近的应力情况,合理设计防止介质损坏。端面抽运板条的设计中,需要根据抽运光的强度、介质的掺杂浓度来设计增益介质的长度,保证抽运光充分吸收的基础上,使抽运光分布均匀,这样增益介质的热分布也比较均匀。

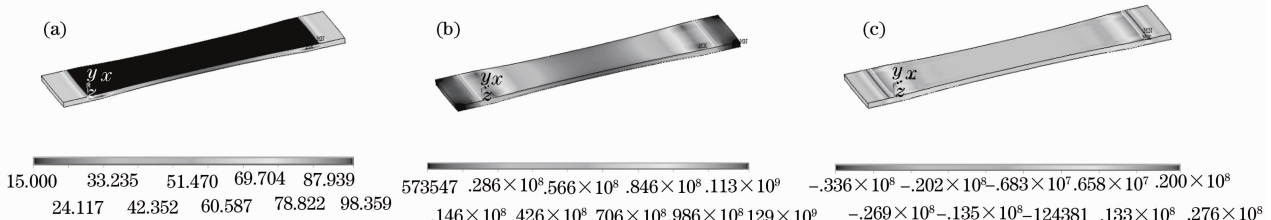


图 2 板条热结构情况。(a)温度分布,(b)等效应力分布,(c)z 方向应力分布

Fig. 2 Thermal structure of slab laser medium. (a) temperature distribution, (b) equivalent stress distribution, (c) z direction stress distribution

3 实 验

采用 FLIR 红外热像仪对板条功率放大模块在

工作时增益介质的温度进行测量。所得实验结果如图 3 所示。

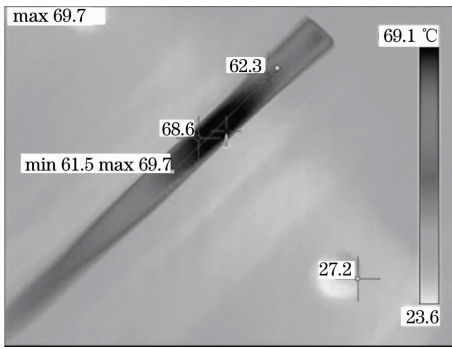


图 3 单端抽运时增益介质的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution with single edge pump

从图 3 中可以看出板条介质的温度分布与仿真结果一致,在键合位置温度最高,随着 YAG 吸收路径的变长,温度逐渐降低。因为端头为未掺杂 YAG 不吸收抽运光因此温度较低。经过实验与理论的对比,证实了设计功放模块的散热能力满足实际需求。

以此为参考设计了高功率放大模块,并搭建了激光放大链路。激光放大链路主要由单横模种子激光器、激光整形系统、激光预放、四级功放模块和高功率激光器测试系统 5 部分构成,如图 4 所示。高光束质量的种子光激光器是保证整个激光链路高质量输出的基础,采用单横模激光器作为种子光源,其输出功率为 2.5 W,光束质量 $M^2=1.2$ 。光束整形系统用来保证种子光与功率放大模块增益区的匹配,预放模块将 2.5 W 的种子光放大到 300 W 后注入到四级功放模块,放大后输出激光采用自适应光学系统进行光束净化,最后获得了 11 kW 的高功率激光输出,光束质量为 4.8。

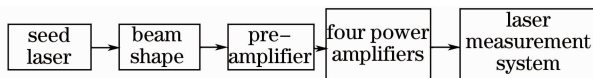


图 4 高功率激光链路组成示意图

Fig. 4 Part of high power laser chain

4 结 论

高平均功率高光束质量激光器有着广泛的应用,在工业加工技术领域有重要的应用价值。设计了高功率放大模块,并搭建了激光放大链路,实现了 11 kW 激光输出。针对高功率板条增益放大模块的研制,数值模拟和实验测量了高功率 LD 阵列抽运条件下,键合板条增益介质的温度和应力分布

情况,得到了在键合面位置温度最高,随着 YAG 吸收路径的变长,温度逐渐降低的规律。理论和实验结果表明,键合面的位置是增益介质中承受应力最弱的部分,所以要特别注意键合面附近的应力情况,合理设计防止介质损坏。并且在板条增益介质的设计过程中应合理设计板条的掺杂浓度,在抽运光被充分吸收的基础上,保证抽运光在介质内均匀分布。

参 考 文 献

- 1 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- 2 周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- 3 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4): 605~625
- 4 M. Rotter, S. Mitchell. Diode-pumped Nd:GGG laser-first light, laser science and technology[R]. UCRL-TB-136126-02-12, 2002
- 5 C. T. Walters, J. L. Dulaney, B. E. Campbell *et al.*. Nd-glass burst laser with kW average power output [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2): 293~299
- 6 M. D. Rotter, C. B. Dane, S. Fochs *et al.*. Solid-state heat-capacity lasers: good candidates for the marketplace [J]. *Photonics Spectra*, 2004, **38**(8): 44~52
- 7 Wu Wuming, Guo Shaofeng, Xi Fengjie *et al.*. Analysis of self-adjusting compensation of thermal lens in rod-glasses heat-capacity laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 107~109
- 8 吴武明, 郭少锋, 刁锋杰等. 棒状钕玻璃热容激光器热透镜自平衡补偿方法分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 107~109
- 9 W. Koechner. *Solid-State Engineering* [M]. New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1999. 391~405
- 10 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry-part I; theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**: 289~301
- 11 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry-part II; thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**: 1195~1210
- 12 Northrop grumman corporation, photorelease-northrop Grumman scales new heights in electric laser power, achieves 100 kilowatts from a solid-state laser [EB/OL]. Redondo Beach, Calif., Mar. 18, 2009
- 13 Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858
- 14 程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器热效应分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858
- 15 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
- 16 邵 杰, 李小莉, 冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501