

文章编号: 1001-3806(2011)05-0629-03

高功率端面冷却片状 Yb:YAG 激光器水冷结构设计

蒋新颖, 郑建刚, 严雄伟, 段文涛, 李明中, 於海武, 张永亮, 单小童
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了实现高功率 Yb:YAG 激光器的高效冷却, 对大口径片状 Yb:YAG 激光器的水冷结构进行了设计, 采用有限元方法对该结构的传热效果进行了数值模拟, 得到了该结构的表面对流传热系数、换热面的温度分布等参量。结果表明, 该设计可以得到均匀的传热系数分布和温度分布, 传热系数达到 $1.8 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 介质表面温差在 1K 以内, 换热效果良好。

关键词: 激光技术; 对流换热; 高功率激光器; 传热系数; 温度分布

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.015

Structural design of the water cooling system in a high power end cooled Yb:YAG slab laser

JIANG Xin-ying, ZHENG Jian-gang, YAN Xiong-wei, DUAN Wen-tao, LI Ming-zhong,
YU Hai-wu, ZHANG Yong-liang, SHAN Xiao-tong

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

Abstract: In order to achieve a high cooling efficiency of a high power Yb:YAG laser, its water cooling structural was designed, and the heat transfer effect of this structure was simulated by means of finite element method. Surface coefficient of heat transfer and the temperature distribution on the heat exchange surface were obtained. The results indicate that the distribution of the transfer coefficient and the temperature is uniform distribution in this structure. The coefficient of heat transfer reached $1.8 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and the temperature difference on the surface was less than 1K, which indicate a good heat transfer effect.

Key words: laser technique; heat convection; high power laser; coefficient of heat transfer; temperature distribution

引言

激光二极管抽运的固体激光器 (diode pump solid-state laser, DPSSL), 因其可以实现重复频率运行以及具有较低的热产额, 得到了广泛的研究^[1-3]。目前, 国外学者正在积极开展以 Yb 材料为激光介质的 DPSSL 技术研究, 用于惯性聚变能源驱动器以及高能拍瓦装置的抽运源^[4]。虽然二极管抽运较氙灯抽运的产热率有了大幅下降, 但是在重频高功率的运转条件下, 激光介质的热负载仍然不能忽略。热管理技术是决定高平均功率 DPSSL 激光器性能的关键技术。由于对流换热具有换热效率高的优势, 因此, 国际上大多数 DPSSL 装置的激光介质采用对流换热的方式冷却, 例如美国的 Mercury 装置^[5], 采用 He 气

对流换热冷却, 采用精细的喷嘴结构设计, 取得了均匀高效的冷却效果。德国的 POLARIS 装置^[6] 以及欧洲的 HiPER 装置^[7] 均仿照 Mercury 的气冷结构做了概念设计。但是采用气冷也有一定的局限性, 一是 He 气价格昂贵, 二是由于气体的换热能力有限, 需要对激光介质采用切片的方式, 分成几个薄片, 拉大了抽运光传输的距离, 对抽运用的激光二极管的指向性、发散角以及耦合系统的性能均有较高的要求, 目前国内的工艺水平较难达到。采用水冷的方式具有传热系数高、造价低廉的优势, 法国的 LUCIA 装置采用了水冷的方式^[8], 但是, 由于水流对激光的扰动较大, 因此, 对于端面冷却片状介质的构型, 只能从一面进行冷却, 要达到均匀高效的冷却效果, 必须对水冷通道进行科学的设计。LUCIA 装置先后采用过多种构型^[9], 其效果均不是很理想, 在激光器 10Hz 运行时, 激光能量下降幅度很大, 超过了 60%。作者在 2008 年设计了小口径 Yb:YAG 激光器的水冷结构, 取得了良好的冷却效果^[10]。

作者在小口径水冷结构的基础上, 对大口径片状

作者简介: 蒋新颖 (1979-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: noveltymm@126.com

收稿日期: 2010-11-03; 收到修改稿日期: 2011-01-06

Yb:YAG 激光器的水冷结构进行了设计,采用有限元方法数值模拟了该结构的表面对流传热系数、换热面的温度分布等参量。计算结果表明,该水冷结构具有传热系数高且面分布均匀的特点,可以用于大功率大口径片状激光介质的冷却。

1 结构设计

水冷结构的设计主要考虑两个方面的需求,一是具有较好的换热能力和换热均匀性,二是对激光介质具有稳定的支撑。为了获得较好的换热效果,采用了支撑面开槽的方式,使水流在通过激光介质表面时可直冲通过,避免在介质表面形成漩涡。同时,为了稳定地支撑介质,在介质口径较大的情况下,采用了断续开槽的方式,以增大支撑强度。本文中主要针对大口径晶体的换热结构进行讨论。该结构的晶体口径为 $\varnothing 30\text{mm}$,贴近晶体的水层厚度设计为 1mm ,水流通道边界如图1所示,图1中间的白色边圆柱区域内为晶体。

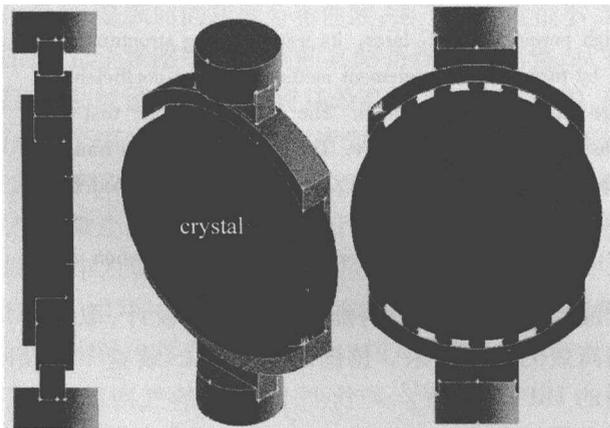


Fig. 1 Schematic of the cooling structure with fluting on bearing surface

2 数值模拟

2.1 求解方法

采用有限元软件 FLUENT 对换热效果进行了数值模拟。首先利用 GAMBIT 建立了 3 维实体模型,并划分网格,定义流速入口、出口、换热面等边界,导出 mesh 文件,如图 2 所示。

由 FLUENT 导入 mesh 文件并设置求解器,流体模型为 3 维定常不可压缩粘性流动,湍流模型选取工程中常用的标准 $K-\epsilon$ 方程,并选择能量方程,采用非耦合求解。流体为水,采用 FLUENT 材料库中提供的液态水的物理参量,密度为 998.2kg/m^3 ,比定压热容为 $4182\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,热导率为 $0.667\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,动力黏度为 $0.001003\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。定义入口流速为 5m/s ,水温

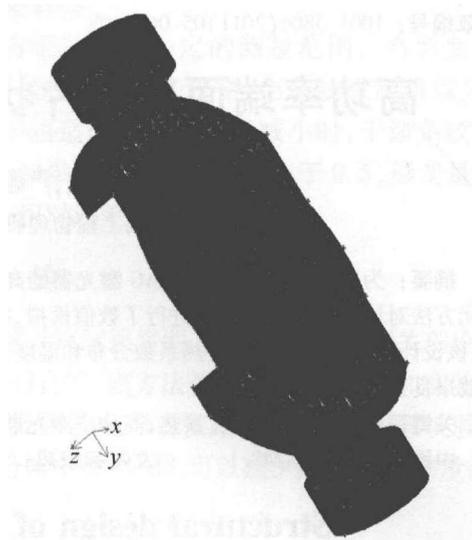


Fig. 2 3-D model and meshing of the cooling structure

换热面积热流量为 $1.5 \times 10^5\text{W/m}^2$ 。Yb:YAG 的物理参量为:密度为 4560kg/m^3 ,比热容为 $590\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,热导率为 $11\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.2 计算结果

对该结构的换热效果进行了计算,得到了传热系数分布、温度分布等参量。图 3 中给出了传热面上的传热系数分布情况,其中黑色矩形框内部为有效的激光作用区域。由图 3 可见,传热系数在流体到达换热面后迅速匀滑,在激光作用区域内分布均匀,传热系数达到 $1.8 \times 10^4\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,效果良好。图 4 中给出了换热面的温度面分布以及中心线上的线分布,由图 4

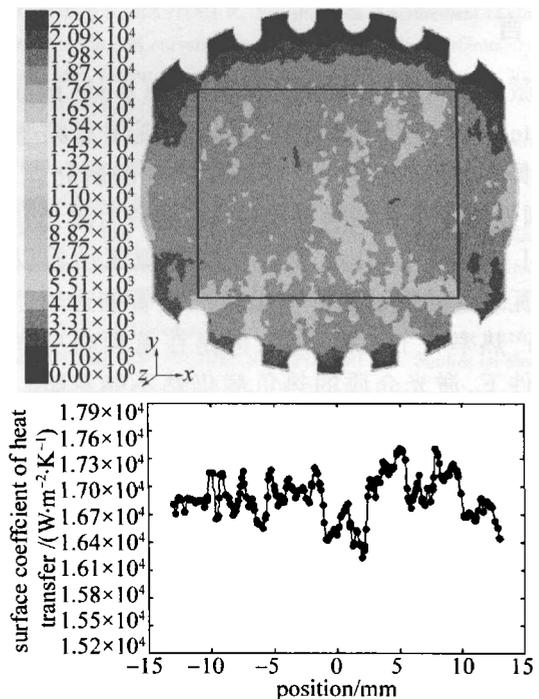


Fig. 3 The surface coefficient of heat transfer distribution on the heat exchange surface

可见,在有效区域内,换热面温度分布均匀,温差在 1K 以内,温度升高在 8K 以内。

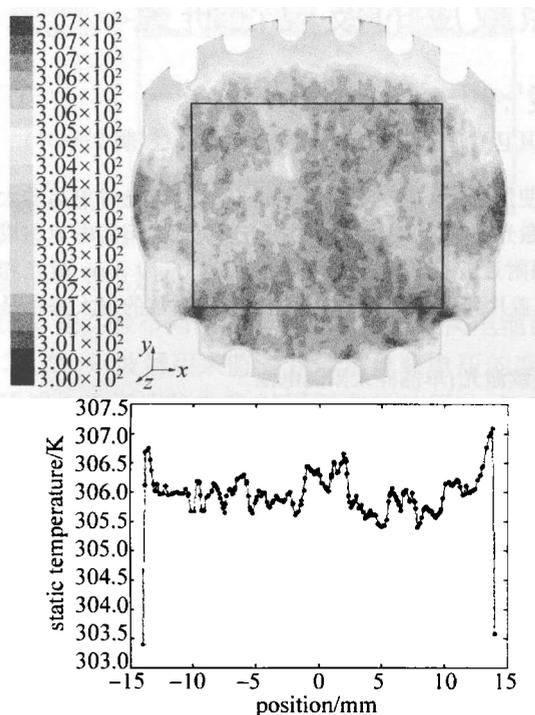


Fig. 4 Temperature distribution on the heat exchange surface

3 结论

对大口径端面冷却片状固体激光器的水冷结构进行了设计和数值模拟,数值模拟结果表明,该结构可以得到均匀的传热系数分布和温度分布,传热系数达到 $1.8 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,介质表面温差在 1K 以内,换热效果良好,可用于高功率端面冷却激光器。

(上接第 612 页)

面状况的不同。不同的测量技术经常对不同的物理参量很敏感,从而导致了不同的测量结果。注入水平和温度的变化可以显著影响载流子动力,进而影响载流子寿命^[8-10]。本文中只研究了室温下、激发强度不同时,4H-SiC 晶圆中少数载流子的寿命,没有涉及到不同温度及掺杂水平下载流子寿命的变化,这将是以后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] GALECKAS A, LINNROS J, FRISCHHOLZ M, *et al.* Investigation of surface recombination and carrier lifetime in 4H/6H-SiC[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, B61/62: 239-243.
- [2] GALECKAS A, LINNROS J, LINDSTEDT M. Characterization of carrier lifetime and diffusivity in 4H-SiC using time-resolved imaging spectroscopy of electroluminescence[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, B102(1/3): 304-307.
- [3] MASASHI K, MASAHIKO K, TATSUHIRO M, *et al.* Excess carrier lifetime in a bulk P-type 4H-SiC wafer measured by the microwave

参 考 文 献

- [1] SIEBOLD M, HEIN J, WANDT C, *et al.* High-energy, diodepumped nanosecond Yb:YAG MOPA system[J]. *Optics Express*, 2008, 16(6):3674-3679.
- [2] ARMSTRONG J P, BAYRAMIAN A J, CAMPBELL R W, *et al.* High energy hybrid fiber-Yb:SFAP laser with dynamic spectral and temporal pulse shaping[C]//The Conference on Laser and Electro-Optics/The Quantum Electronics and Laser Science. San Jose, USA: OSA, 2008: CThFF5 1-2.
- [3] YAO Zh Y, JIANG J F, TU B, *et al.* 1.5kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 35-38 (in Chinese).
- [4] YU H W, XU M J, DUAN W T, *et al.* Research progress of laser drivers for inertial fusion energy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006(9): 55-62 (in Chinese).
- [5] BAYRAMIAN A. Mercury project/Petawatt update[EB/OL]. (2009-06-16) [2009-11-06]. http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = * &pOid = 29542.
- [6] CHATAIN D, PERIN J P. A cryo-loop for polaris crystal amplifier [EB/OL]. (2009-06-16) [2009-11-06]. http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = * &pOid = 29573.
- [7] ERTEL K, HERNANDEZ-GOMEZ C, MUSGRAVE L, *et al.* Concept for a kJ-class DPSSL amplifier[EB/OL]. (2009-06-16) [2009-11-06]. http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = * &pOid = 29568.
- [8] BOURDET G L, YU H W. Longitudinal temperature distribution in an end-pumped solid-state amplifier medium: application to a high average power diode pumped Yb:YAG thin disk amplifier[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 6033-6041.
- [9] BAHBAH S, ALBACH D, CHANTELOUP J C, *et al.* Gain & thermal distortion investigation on the Yb:YAG diode pumped Lucia oscillator[C]//The Conference on Lasers and Electro-Optics/The Quantum Electronics and Laser Science. San Jose, USA: OSA, 2008: CFQ3 1-2.
- [10] DUAN W T, JIANG X Y, JIANG D B, *et al.* 10Hz joule-class laser diode end-pumped V-shape water-cooled Yb:YAG oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 44-48 (in Chinese).
- [11] photoconductivity decay method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(8A): 5057-5061.
- [12] YANG D R. Testing and analysis of semiconductor materials[M]. Beijing: Science Press, 2010: 60-74 (in Chinese).
- [13] CITARELLA G, VON AICHBERGER S, KUNST M. Microwave photoconductivity techniques for the characterization of semiconductors[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, B91/92: 224-228.
- [14] LIU Zh C. Measurement of the minority carrier lifetime in HgCdTe by the microwave photoconductivity decay method[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(1): 28-29 (in Chinese).
- [15] GRIVICKS P, GALECKAS A, LINNROS J, *et al.* Carrier lifetime investigation in 4H-SiC grown by CVD and sublimation epitaxy[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2001, 4(1/3): 191-194.
- [16] ZHANG J, STORASTA L, BERGMAN J P, *et al.* Electrically active defects in N-type 4H-silicon carbide grown in a vertical hot-wall reactor[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(8): 4708-4714.
- [17] KLEIN P B. Carrier lifetime measurement in N-4H-SiC epilayers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(3): 033702/1-033702/14.
- [18] KLEIN P B, SHANABROOK B V, HUH S W, *et al.* Lifetime limiting defects in 4H-SiC[J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 3: 173-174.