

doi: 10.3788/gzxb20164503.0314007

# 液冷薄片构型激光器及其热管理技术

杨鹏<sup>1</sup>, 马仑<sup>1</sup>, 姜彦玲<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 聂荣志<sup>2</sup>, 赵鹏飞<sup>2</sup>, 余江波<sup>2</sup>

(1 长安大学 信息工程学院, 西安 710069)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

**摘 要:**为了解决增益介质的热效应问题,提出了一种浸没式构型液冷激光器方案,该构型激光器在 10Hz 重复抽运频率下,获得了 615mJ 的能量输出,光光转换效率为 21%,斜率效率为 23%。基于流体力学和热力学原理,建立了激光器增益区流场的热-流-固耦合模型,利用软件模拟和有限元分析法,研究了在不同流速、泵浦功率条件下,整个增益区的温度场、速度场的分布特性;并基于增益区温度场的分布,分析了液冷条件下通过增益区的激光波前畸变特性。结果表明,增益介质的最大光程差为 0.7666λ,冷却液最大光程差为 -4.7331λ,说明该构型激光器有着良好的热管理性能。

**关键词:**薄片激光器;液体冷却;热效应;热管理;波前畸变

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)03-0314007-5

## Thermal Management Technology of a Liquid Cooling Thin-disk Oscillator

YANG Peng<sup>1</sup>, MA Lun<sup>1</sup>, JIANG Yan-ling<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, NIE Rong-zhi<sup>2</sup>, ZHAO Peng-fei<sup>2</sup>, SHE Jiang-bo<sup>2</sup>

(1 School of Information Engineering Chang an University, Xi'an 710064, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the thermal effect of the laser gain media, a configuration named "immersed thin-disk oscillator" solid laser cooled directly with flow was proposed. Under the repeated pumping frequency of 10Hz, a maximum output energy of 615mJ was realized. The optical-optical efficiency and the slope efficiency is 23% and 21% respectively. Based on the principle of fluid mechanics and thermodynamics, the thermal-flow-solid coupling model of lasing region was established. By using the software and the method of finite element analysis, the distribution characteristics of temperature field and velocity field were studied under the conditions of different flow rate and pump power. The wavefront aberration of the laser passing the gain region was simulated under the condition of liquid-cooled. The maximum optical path difference of the gain medium and coolant liquid are 0.7666λ and -4.7331λ respectively. The results show that the laser has a good thermal management performance.

**Key words:** Thin-disk lasers; Liquid cooling; Thermal effect; Thermal management; Wavefront aberration

**OCIS Codes:** 140.3480; 140.3538; 140.3580; 140.3320; 140.2010

## 0 引言

热管理问题是制约高能激光系统发展的主要障碍之一<sup>[1-3]</sup>。增益介质在抽运过程中由于热积累而导致严重的热效应,包括热透镜效应、应力双折射等,当热积

累到一定程度后,会导致激光介质内部的应力超过其破坏阈值,造成工作介质炸裂<sup>[4]</sup>。因此,热效应成了制约高平均功率、高能量激光器发展的主要瓶颈。为了有效控制增益介质中的热效应问题,各种激光器热管理技术方案被提出并得到不断发展,比如经典的热容激

基金项目:陕西省自然科学基金计划(No. 2015JM6278)和中国博士后科学基金和国家自然科学基金(No. 61308086)资助

第一作者:杨鹏(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为流体激光器。Email: dream1946@126.com

导师:马仑(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为阵列信号和雷达信号处理。Email: luma@126.com

通讯作者:余江波(1983-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光功能材料与器件。Email: shejb@opt.ac.cn

收稿日期:2015-09-14;录用日期:2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>



达到 730mJ,随后逐渐降低,大约 5s 后输出能量稳定在 615mJ.激光器稳定后能量输出不稳定性为 1.27%,前 5s 的波动为激光器热平衡的建立期,当产热和废热管理达到平衡,激光输出趋于稳定.

### 3 理论研究

对于设计的液冷薄片来讲,其三维有热源的瞬态热传导模型为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_s - T_f) \quad (2)$$

$$T(x, y, z; 0) = T_0(x, y, z) \quad (3)$$

式(2)为边界条件;式(3)为初始条件;式(1)中  $\rho, c, k$  分别为介质的密度、比热容和导热系数,数据见表 1,  $n$  表示介质的法线方向,  $h$  为介质表面与周围冷却液体的对流换热系数,  $T_s$  为薄片表面温度,  $T_f$  为冷却液的温度,  $T_0$  为初始时刻温度.

表 1 Nd:YAG 和冷却液的物理参数表

Table 1 Parameter of Nd:YAG and cooling liquid

	$\alpha/$ $\text{cm}^{-1}$	$\kappa/$ $(\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_p/$ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Nd:YAG	4	14	590	4 560
$\text{CCl}_4$	0.12%	0.12	850	1 594

$q_v$  为材料的内热源强度,与泵浦功率的大小和能量空间分布有关,而且在重复脉冲工作状态下还与时间有关,在两个脉冲间隔期间  $q_v$  为 0.当泵浦光在入射面均匀分布时,  $q_v$  值的空间分布可表示为<sup>[11]</sup>

$$q_v(x, y, z) = \frac{P \cdot \eta}{ab} \exp(-\alpha z) \cdot \alpha \quad (4)$$

式中,  $a, b$  为泵浦区域的边长,  $P$  为泵浦功率,  $\eta$  为泵浦功率的生热百分比,  $\alpha$  为介质对泵浦光的吸收系数.  $P=5\,500\text{ W}$ ,  $a \times b=10\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ ,  $\eta=40\%$ ,  $\alpha=4\text{ cm}^{-1}$ .在计算时将泵浦光入射面近似看作均匀分布,考虑到本文中 Nd:YAG 厚度为 2 mm 且较小,忽略泵浦光在介质内部的发散,可认为泵浦光仅在  $10\text{ mm} \times 16\text{ mm}$  区域内纵向上呈 e 指数衰减.

对于导热方程式(1)~(3),常用求解方法是有限元分析,即将连续求解离散化.本文采用 FLUENT 来求解导热方程,FLUENT 进行热分析的基本原理是将待分析的对象划分成有限个单元,然后根据能量守恒原理来求解一定边界条件和初始条件下各个节点的热平衡方程,由此求出各节点温度,进而求解出温度梯度等其他相关量.

当冷却液对激光光路流动冷却时,除了增益介质废热积累会对波前造成影响外,流场的热分布也会对波前产生影响.

对于增益介质来讲,光程差可表示为<sup>[12]</sup>

$$\Delta \text{OPD}_{\text{liquid}} = \sum_1^n \frac{\partial n_L}{\partial T} (T_n - T_0) (X_n - X_{n-1}) \quad (5)$$

对于冷却液来讲光程差可以表示为

$$\Delta \text{OPD}_{\text{solid}} = \sum_1^n \left[ \frac{\partial n_S}{\partial T} + (1 + \nu) (n_0 - 1) \beta \right] \cdot (T_n - T_0) (X_n - X_{n-1}) \quad (6)$$

式中,  $\nu$  是泊松比,  $\beta$  是材料的热膨胀系数.

### 4 模拟结果和讨论

针对复杂几何区域内的流体流动与传热现象,可以采用 FLUENT 软件对增益池内的光学分析问题进行分析.利用前处理软件创建新构型薄片激光器耦合模型,设置增益介质和冷却液的参量,打开能量方程、湍流方程,设置边界条件,选择非稳态数值解法,入口设为速度入口,出口为自由出口,进行迭代求解,监测残差曲线,直到达到收敛条件.计算结束后就可以得到增益池内的温度场分布、速度场分布,再将获得的数据导入 MATLAB 软件,并结合光程差的计算公式,即可得到增益区的波前畸变<sup>[13]</sup>.

#### 4.1 液体流速对增益介质温度分布的影响

在 10 Hz 抽运频率下,对入口流速为 1 m/s 时的热管理特性进行模拟.图 3 为增益介质在不同入口流速情况下的温升变化曲线,0.1 m/s 时最大温升约为 25℃,5 m/s 时的最大温升约为 4℃.可以看出,随着入口速度的增大,温升不断减小,所以适当增大入口流速,能够有效地避免热量累积,显著提高激光器热管理特性.

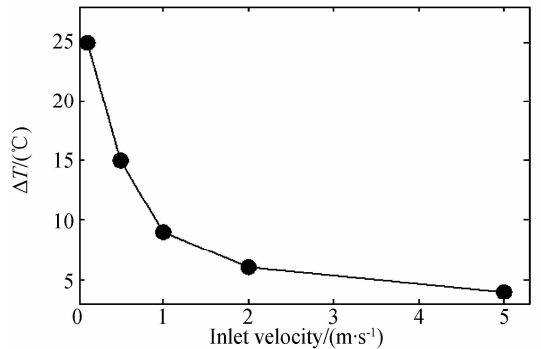


图 3 不同入口流速下的温升大小

Fig. 3 The temperature difference under different inlet velocity

图 4(a)为入口流速 1 m/s 时,增益池内部的速度云图.可以看出,靠近增益介质中心的流场速度大于其它位置的,形状近似马鞍形,这是由于入口形状设计造成的;图 4(b)为入口处流速 1 m/s 时,增益区的温度场分布,可见,增益介质中间温度低,两边温度高,这是由于靠近增益介质中间的流场速度大,带走了较多的热量,和图 4(a)的描述一致.增益介质内部最大温升为 9℃,中心处和边缘处的温差约为 3℃,温度梯度变化均匀,说明具有良好的热管理特性.

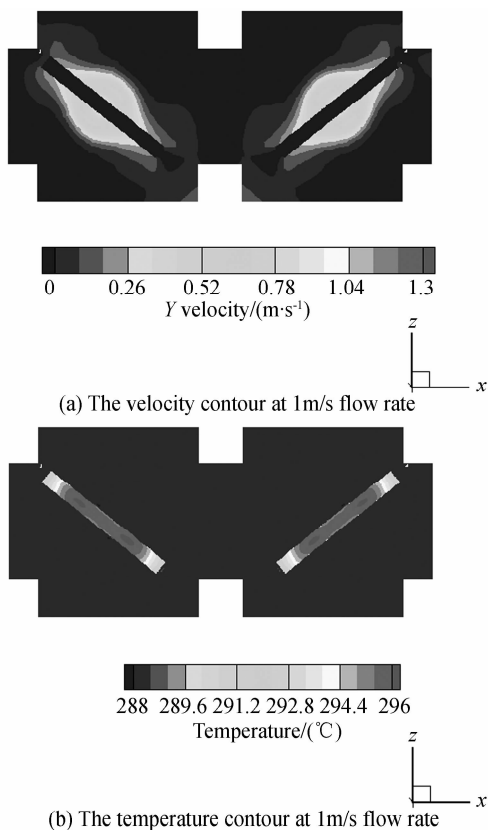


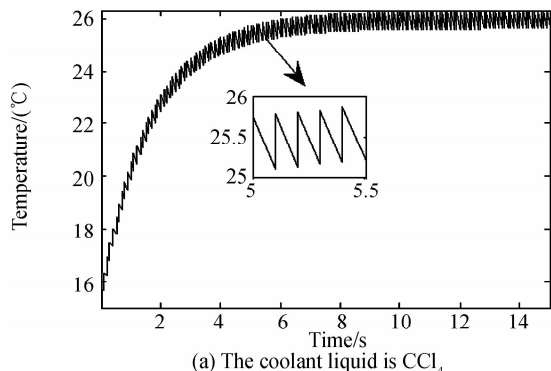
图4 垂直于入口方向截面云图

Fig. 4 The cross section contour of the direction perpendicular to the inlet

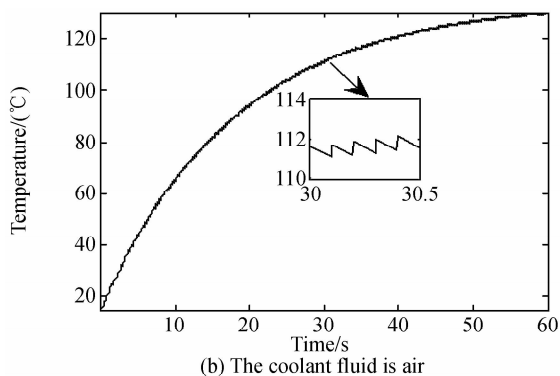
#### 4.2 增益区温度场变化及波前畸变特性

液冷薄片型激光器在重复频率下工作时,激光作用出现在抽运周期的中后期,光学畸变来自于抽运过程中产生的热梯度,而非来自冷却造成的热流.在重复抽运时,增益介质内部热量在下次抽运来临之前仍会有残留,并随着抽运次数的增加,增益介质的热积累增加,最终会达到稳定状态.

设定抽运频率为 10 Hz,冷却液入口速率为 1 m/s,增益介质内部温升随抽运时间的变化关系如图 5 (a).由图可知,该构型激光器在大约 5s 后温度变化趋于稳定,达到稳定耗时短;增益介质内部最高温度约为 26 °C,最大温升 11 °C,所以在 10 Hz 的抽运频率下,该激光器有着良好的热管理性能.图 5(b)显示了在相同



(a) The coolant liquid is CCl<sub>4</sub>



(b) The coolant fluid is air

图5 增益介质内部温升

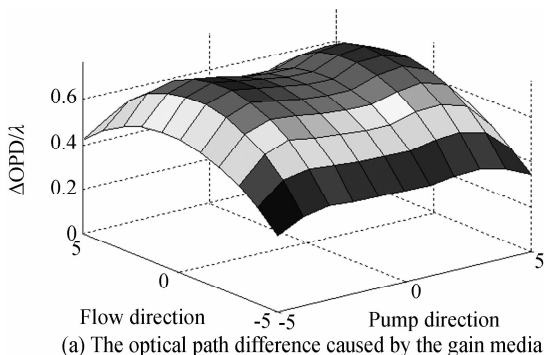
Fig. 5 The gain medium internal temperature rise

抽运频率下,采用空气冷却,流速 15 m/s 时温度随时间的变化情况.从图中不难看出,尽管采用了高流速的空气冷却,但是增益介质温升仍然很大,最高温度约为 129 °C,最大温升 114 °C,在 60 s 的泵浦时间内,温度持续升高,仍没有达到稳定状态,热量累积严重.

图 5(a)和图 5(b)对比分析表明,在 10 Hz 的抽运频率下,该构型激光器增益介质内部没有出现明显的热量累积,即在抽运周期内,1 m/s 流速的冷却液对增益介质有良好的降温效果,即该高频率抽运时,该构型激光器工作更加稳定,光束热致畸变较小.

将 FLUENT 计算的温度数据导入 MATLAB 中,根据式(5)和式(6)绘制光程差分布图.

由增益介质引起的光程差分布如图 6(a),光程差范围为  $0.3419\lambda \sim 0.7666\lambda$  之间,峰谷值为  $0.4247\lambda$ ,其中  $\lambda$  为 1064 nm. 可以看到,在 Y 轴方向中心处的光程差比两侧的小,这与增益介质中间温度比两侧低的分布相一致.由冷却液体引起的总的光程差如图 6(b),光程差范围在  $-3.6495\lambda \sim -4.7331\lambda$  之间,峰谷值为  $1.0836\lambda$ .由于靠近增益介质的地方温度高,所以中心处的光程差大于两侧.实际上光程差是二者的共同作用,总的光程差如图 6(c),增益介质的温度折射系数为正,液体的温度折射系数为负,两者相互补偿.可以看出,经过补偿后,整体的光程差减小,相比较于液体引起的光程差,补偿后为  $-3.0553\lambda \sim -4.1450\lambda$ ,峰谷值为  $1.0897\lambda$ .



(a) The optical path difference caused by the gain media

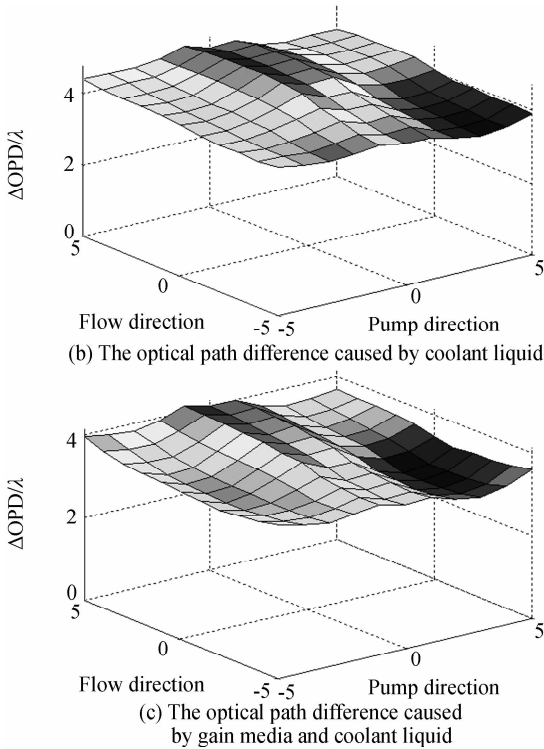


图6 光程差

Fig. 6 The optical path difference

## 5 结论

本文设计了一种薄片构型激光器,在 10 Hz 抽运频率下,获得了 615 mJ 的能量输出,光光效率为 21%,斜率效率为 23%,并通过建立抽运后的热-流-固耦合模型,完成了该构型薄片激光器的瞬态模拟分析,为研究其有效热管理提供了理论依据。在 10 Hz 抽运频率下,增益介质的最大光程差为  $0.7666\lambda$ ,冷却液最大光程差为  $-4.7331\lambda$ ,波前畸变主要由液体引入,因此控制流场均匀性是发展这种激光器的关键。模拟结果表明,该构型薄片激光器有着良好的热管理性能。目前,该构型薄片激光器已经实现激光输出,为解决高能固体激光器的热管理问题提供了研究思路。

### 参考文献

[1] LI Long, GAN An-sheng, QI Bing, *et al.* Thermal effect of LD end-pumped Nd:YAG crystal with variable thermal conductivity[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(5):612-616.  
李隆,甘安生,齐兵,等. LD 端面抽运变导热系数 Nd:YAG 晶体热效应[J]. *激光技术*, 2012, **36**(5):612-616.

[2] PENG Yu-feng, WU Ding-yun, ZHANG Yi, *et al.* Simulation and structure design of a high power laser mirror with self-compensation of thermal distortion[J]. *Laser Technology*,

2012, **36**(1): 120-123.  
彭玉峰,吴定允,张毅,等. 高功率激光反射镜热畸变补偿结构设计及仿真[J]. *激光技术*, 2012, **36**(1): 120-123.

[3] REN Guo-guang. New tactical high energy liquid laser[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4): 418-421.  
任国光. 新型战术高能液体激光器[J]. *激光技术*, 2006, **30**(4): 418-421.

[4] ZHOU Shou-heng, ZHAO Hong, TANG Xiao-jun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese Laser*, 2009, **36**(7): 1605-1618.  
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.

[5] LEI Cheng-qiang, WANG Yue-feng, HUANG Feng, *et al.* Progress of high power solid-state laser pumping and coupling technology[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(6):725-733.  
雷呈强,汪岳峰,黄峰,等. 高功率全固态激光器抽运耦合技术发展[J]. *激光技术*, 2011, **35**(6):725-733.

[6] SONG Qiong-ge, CHENG Guang-hua, BAI Jing, *et al.* System design and research of Yb:YAG thin disk laser with direct cooling arrangement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **10**(43).  
宋琼阁,程光华,白晶,等. 直接水冷的 Yb:YAG 薄片激光器系统设计与实验研究[J]. *光子学报*, 2014, **10**(43).

[7] Gizmag's Email Newsleter, General Atomics USA[EB/OL]. [2015-05-30]. <http://www.gizmag.com/lightweight-high-energy-liquid-laser-hellads-live-fire-tests/37742/>.

[8] FU X, LI P L, LIU Q, *et al.* 3KW liquid-cooled elastically-supported Nd:YAG multi-slab CW laser resonator[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 18421.10.

[9] NIE R Z, SHE J B, ZHAO P F, *et al.* Fully immersed liquid cooling thin-disk oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, **11**(11): 115808.

[10] LI P L, FU X, LIU Q, *et al.* Effects of turbulent flow field on wavefront aberration in liquid-convection-cooled disk laser oscillator [J]. *Applied Physics B: Laser and Optics*, 2015, **119**(2): 371-380.

[11] WANG Ming-zhe. Research on new cooling technology for thermal management of high power solid-state lasers[D]. Chang Sha: National University of Defense Technology, 2011:12-13.  
王明哲. 高功率固体激光器热管理新技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2011: 12-13.

[12] PEI Zheng-ping, TANG Chun, TU Bo, *et al.* Simulation of thermal effect on beam distortion in Nd:YAG thin disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1615-1618.  
裴正平,唐淳,涂波,等. Nd:YAG 薄片激光器热致波前畸变[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1615-1618.

[13] DING Jian-yong, GUI Luo, PENG Bo, *et al.* Thermal analysis of the neodymium-doped microspheres array lasers [J]. *Laser Technology*, 2014, **38**(3): 17-20.  
丁建永,桂路,彭波,等. 掺钕玻璃微球阵列激光器及其热管理研究[J]. *激光技术*, 2014, **38**(3): 17-20.