

薄片激光器低畸变冷却技术研究

蒋琳, 刘军*, 袁晓蓉, 张浩, 李春领, 蔡光明

中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 薄片激光器的导热距离短,能显著降低热透镜效应,已经成为高功率固体激光研究的热点。然而,随着泵浦口径和泵浦功率的不断增大,热效应愈发严重,其造成的热致畸变成为限制激光器出光功率和光束质量的主要因素之一。针对大尺寸薄片激光器工作时热致畸变过大的情况,提出了基于非均匀冷却的微通道复合射流冲击的流道设计思路。基于该思路完成了中心辐射结构冷却器的设计,并借助流-固-热耦合仿真,研究了不同冷却器的流道结构参数对增益介质热致畸变的影响。实验结果表明,采用中心辐射结构的冷却器能将相同条件下的增益介质的光学畸变缩小 50%。

关键词 激光器;薄片激光器;微通道;射流冲击;波前畸变

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0301001

1 引言

薄片激光器设计的核心思想是采用口径远大于厚度的圆盘状薄激光增益介质,通过使增益介质内的热量以接近一维的方式进行传输且光束的传播方向与轴向平行以实现高效热管理,进而实现高功率、高效率和高光束质量的激光输出^[1]。目前,薄片激光器已成为固体激光研究的热点^[2-3]。随着激光器口径的增大和泵浦功率的增加,增益介质的热效应越来越严重,增益介质本身的光学畸变和热应力导致的热畸变会严重影响光束质量^[4-7]。目前,薄片激光器主流的研究方向包括端面冷却^[8-9]和直接液体冷却^[10-11],本文主要针对端面冷却的薄片激光器开展冷却技术研究。2009年,德国 Stuttgart 大学报道了在近千瓦的泵浦条件下,薄片的热致波前畸变达到近 20 μm 。母健等^[8]在 2012 年通过局部主动冷却技术,实现了直径为 20 mm 的薄片激光器的低热流密度均匀冷却。杨火木等^[9]在 2013 年对采用常规微通道冷却的 40 mm 薄片增益介质进行了仿真分析,发现增益介质表面的温度分布呈不对称分布。2014—2020 年,西南技术物理研究所开展了基于小孔阵列的喷流结构薄片冷却技术研究,结果表

明,随着阵列密集程度的增加,冷却均匀性有一定提升,但换热性能变化不大,高密度密集阵列的温度场仍然存在蜂窝状的高阶起伏^[12-13]。2019 年,曹健东等^[14-15]利用外加应力开展了薄片激光器的热透镜补偿方法研究,发现应力补偿在一定范围内是有效的,但当应力过时光束质量会严重下降。

基于端面冷却的高功率薄片激光增益介质常采用微通道冷却或射流冲击冷却,换热系数基本都能达到 50000 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)^[13],但针对大尺寸高功率薄片增益介质的热致畸变控制优化方面的研究鲜有报道。本文针对直径超过 60 mm、热流密度超过 100 W/ cm^2 的薄片增益介质,根据冷却和畸变控制需求,基于微通道复合射流冲击的技术思路,设计了一款中心辐射结构冷却器。借助流-固-热耦合仿真手段^[16],分析了冷却器不同结构参数对换热性能及增益介质应力畸变的影响,并完成了与原有树形微通道冷却器的仿真和实验对比。

2 冷却结构及原理

中心辐射结构的冷却原理如图 1 所示,该结构通过采用微通道复合射流冲击的冷却方式来实现增益介质的非均匀冷却。换热中心区域通过射流冲击

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2020-09-09; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金

*E-mail: me276317641@163.com

降低了边界层厚度,实现了强化换热,以“削峰”的方式降低了增益介质的中心温度及热致畸变。外周换热流道为中心辐射结构的微通道设计,如图 2 所示,

保证了流场沿周向均匀分布,实现了周向均匀冷却;随着流道向外延伸,通过流道数倍增设计,降低了径向速度梯度,提升了径向冷却的均匀性。

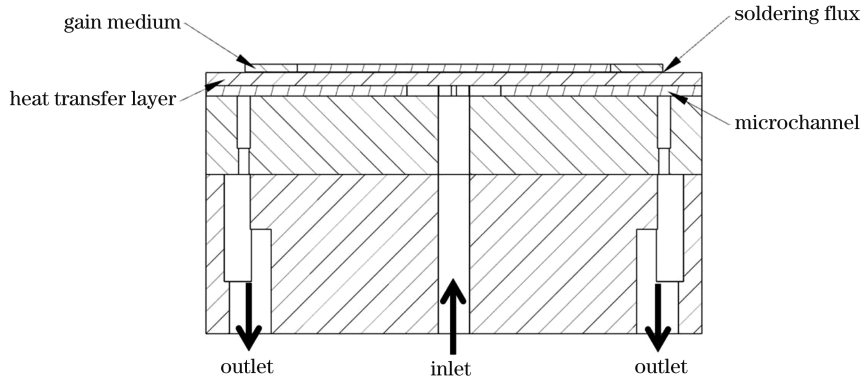


图 1 中心辐射结构冷却器的原理图

Fig. 1 Principle diagram of central radiative structure cooler



图 2 中心辐射结构冷却器的流道结构

Fig. 2 Microchannel structure of central radiative structure cooler

在基于水冷冷却的增益介质热仿真过程中,一般将水视为不可压缩黏性流,其运动方程为经典的纳维-斯托克斯方程,冷却流道按湍流设计,因此可以采用标准的 k-epsilon 模型。

冷却液的温度分布由对流-扩散方程决定:

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T_f \right) = k_f \nabla^2 T_f + 2\mu_0 \mathbf{S} : \mathbf{S} + Q_f, \quad (1)$$

式中: T_f 为温度; t 为时间; c_f 为冷却液比热; \mathbf{v} 为冷却液流速; μ_0 为动力黏度; \mathbf{S} 为形变速率张量; $\mathbf{S} : \mathbf{S}$ 为形变速率张量的双点积运算; k_f 为冷却液导热系数; Q_f 为冷却液体热源,这里取 $Q_f = 0$ 。将(1)式的速度项取为 0,得到固体传热微分方程为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s + Q_s, \quad (2)$$

式中: ρ_s 和 c_s 分别为固体的密度和比热; T_s 为温度; k_s 为固体的导热系数; Q_s 为热源。在流固耦合边界上,热耦合条件为

$$T_s = T_f, \quad (3)$$

$$k_s (\nabla T_s) \cdot \mathbf{n}_s = k_f (\nabla T_f) \cdot \mathbf{n}_f, \quad (4)$$

式中: \mathbf{n}_s 和 \mathbf{n}_f 分别为流体和固体边界的外法线矢量^[9]。

工程应用中通常采用专业的流体力学仿真软件进行分析。考虑到模型的复杂性,本文基于 ANSYS Workbench 平台,通过 Fluent 软件与 ANSYS Mechanical 软件的结合来实现流固热耦合的仿真。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

建立包括薄片增益介质和冷却器的增益模块仿真模型,开展增益模块在加载过程中的流-固-热耦合的仿真分析。增益模块中主要器件材料的物性参数如表 1 所示。增益介质发热区域的直径为 60 mm,热流密度为 108 W/cm²。为了便于对比,冷却水设计的流量为 20 L/min,与该增益介质已有的微通道冷却器的额定流量一致。

表 1 材料的物性参数

Table 1 Physical parameters of materials

Material	Density/ (kg · m ⁻³)	Thermal conductivity/ [W · (m · K) ⁻¹]	Thermal expansion coefficient /10 ⁻⁶	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
YAG	4560	11	7.3	283	0.226
In	7310	82	29	12.7	0.45
Cu	8890	390	16.92	107.9	0.35

通过流-固-热耦合仿真分析,分别研究了冷却器换热面厚度 t 、流道高度 h 以及冷却器入口直径 d 对增益介质畸变的影响。

3.2 参数影响分析

图 3 为增益介质的轴向畸变和最大正应力随热面厚度的变化。增益介质的轴向畸变随热面厚度的增加而增大,但最大正应力呈先增大后减小的趋势。这是因为随着热面厚度的增加,冷却器热阻增加,导致增益介质温度上升,进而引起热致应力应变的增加;另外,热面畸变区域厚度和热变形的增大导致其对增益介质的约束作用减弱,从而增益介质受外界约束产生的热应力减小。

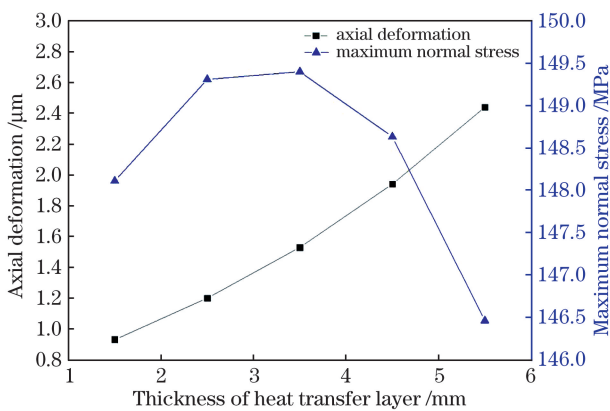


图 3 增益介质的轴向畸变和最大正应力随热面厚度的变化

Fig. 3 Axial deformation and maximum normal stress of gain medium versus thickness of heat transfer layer

图 4 为增益介质的轴向畸变和最大正应力随流道高度的变化。随着流道高度的增加,冷却器的换热性能降低,导致增益介质温度升高,进而导致增益

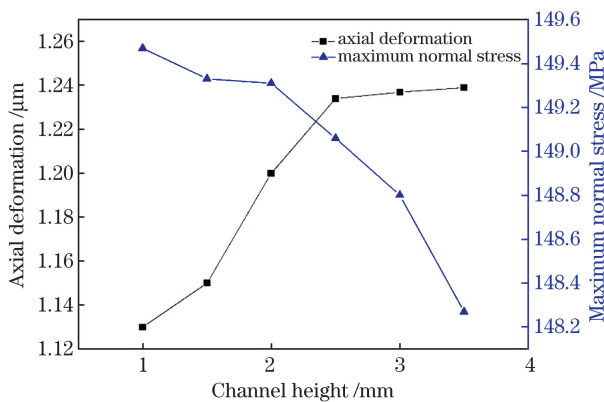


图 4 增益介质的轴向畸变和最大正应力随流道高度的变化

Fig. 4 Axial deformation and maximum normal stress of gain medium versus channel height

介质热变形增加。由于增益介质内部的热应力和冷却器焊接面的约束应力耦合,增益介质的热应力变化并不十分明显。综合来看,流道高度越小,冷却器性能越好,但过矮的流道会造成冷却器阻力增大,需要综合考虑。

由于冷却器的入口直径直接影响到冷却器换热面中心区域的射流冲击换热效果,因此缩小冷却器的入口直径可有效提升冷却器的“消峰”作用,对降低增益介质的热致畸变具有良好的效果,如图 5 所示。但入口直径过小会导致冷却器阻力急剧增大,因此在冷却器入口直径的选择上,应该在保证冷却器阻力满足要求的情况下尽量缩小。

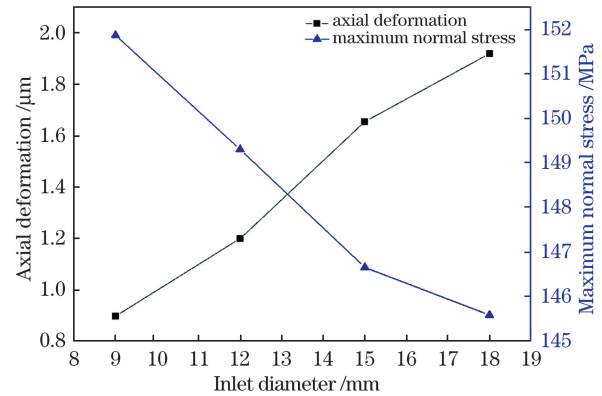


图 5 增益介质的轴向畸变和最大正应力随入口直径的变化
Fig. 5 Axial deformation and maximum normal stress of gain medium versus inlet diameter

4 对比验证

4.1 仿真结果对比

综合考虑冷却器的换热性能、畸变控制效果、阻力及工程应用等因素,最终设计参数为 $t=2.5\text{ mm}$, $h=2\text{ mm}$, $d=12\text{ mm}$ 。采用该中心辐射结构的冷却器的增益介质表面温度如图 6 所示,温度沿周向

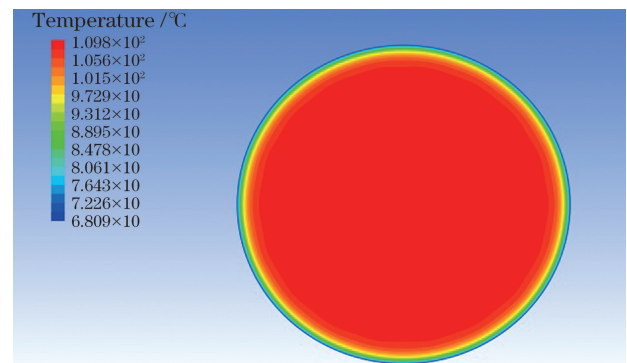


图 6 中心辐射结构冷却器的增益介质表面温度分布
Fig. 6 Surface temperature distribution of gain medium in central radiative structure cooler

的分布十分均匀,最高温度约为 $109.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可计算得到该冷却器的换热系数约为 $5.5\text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 。

图 7 为采用中心辐射结构的冷却器的增益介质轴向畸变分布图,可见畸变主要集中在增益介质的发热区域。增益介质表面提取区域的最大轴向畸变为 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

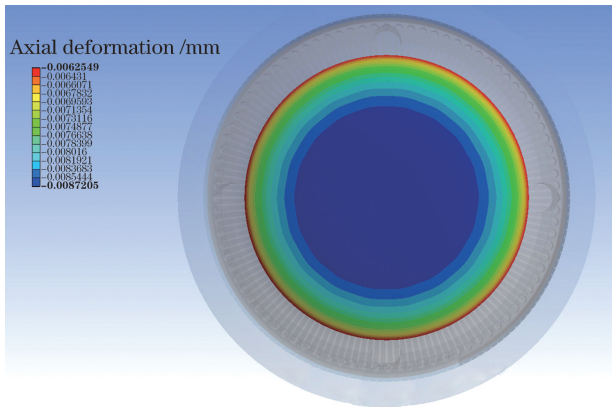


图 7 中心辐射结构冷却器的增益介质轴向畸变
Fig. 7 Axial deformation of gain medium in central radiative structure cooler

该薄片增益介质原有一套冷却系统,其冷却器为树形微通道冷却结构,如图 8 所示。通过调整蛇形微通道的长短和疏密程度,可满足增益介质均匀散热的需求。

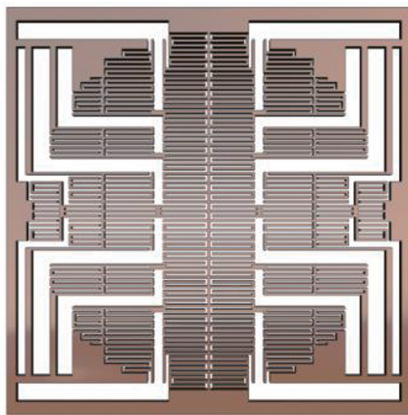


图 8 树形微通道冷却结构
Fig. 8 Tree-shaped microchannel cooling structure

树形微通道冷却器的增益介质表面温度分布和轴向畸变分别如图 9、10 所示。可以看到,该树形微通道结构冷却器的增益介质表面温度最高达 $121.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且温度沿周向存在高低起伏的现象,计算得到冷却器的换热系数接近 $5\text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$;增益介质表面提取区域的最大相对轴向畸变达 $4.3\text{ }\mu\text{m}$,且呈非对称分布,容易产生高阶非对称相差。

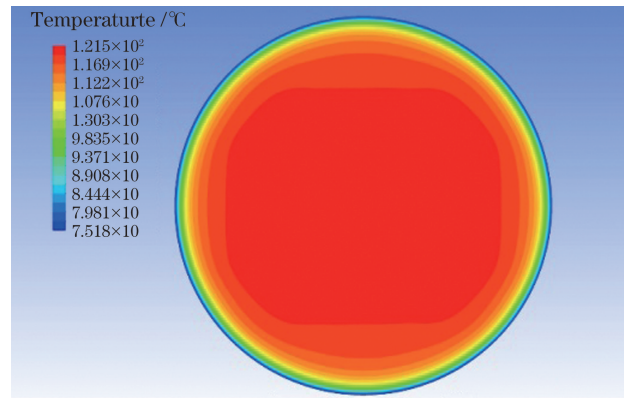


图 9 树形微通道冷却器的增益介质表面温度分布
Fig. 9 Surface temperature distribution of gain medium in tree-shaped microchannel cooler

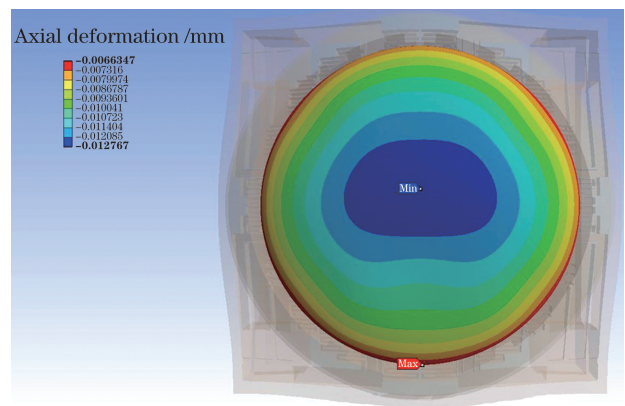


图 10 树形微通道冷却器的增益介质轴向畸变
Fig. 10 Axial deformation of gain medium in tree-shaped microchannel cooler

4.2 实验结果对比

薄片增益介质加载后变形产生的光程差是影响薄片激光器波前畸变的主要因素之一,通过控制增益介质的轴向变形,能有效降低薄片激光器加载时的波前畸变。在中心辐射结构冷却器上焊接增益介质后,将其安装在图 11 所示的实验平台上,与树形微通道冷却器的增益介质进行对比实验。在满功率

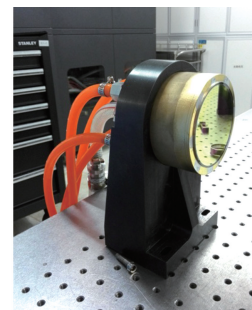


图 11 冷却器的实验平台
Fig. 11 Experimental platform of cooler

加载条件下,原始冷却器的增益介质的波前畸变达到了图 12 所示的 3.27λ (λ 为波长),而优化后的中心辐射结构冷却器的增益介质的波前畸变缩小至 1.6λ (图 13),减幅超过 50%。

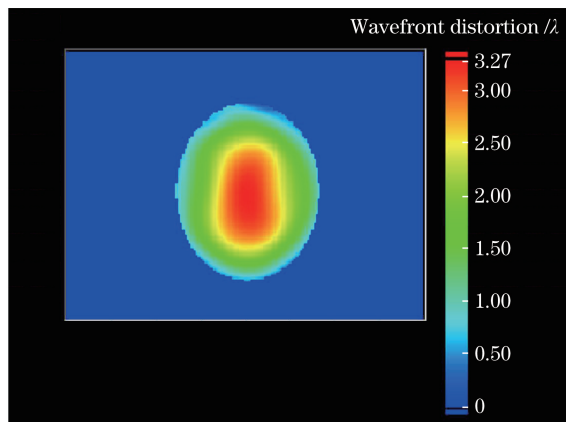


图 12 树形微通道冷却器的增益介质波前畸变

Fig. 12 Wavefront distortion of gain medium in tree-shaped microchannel cooler

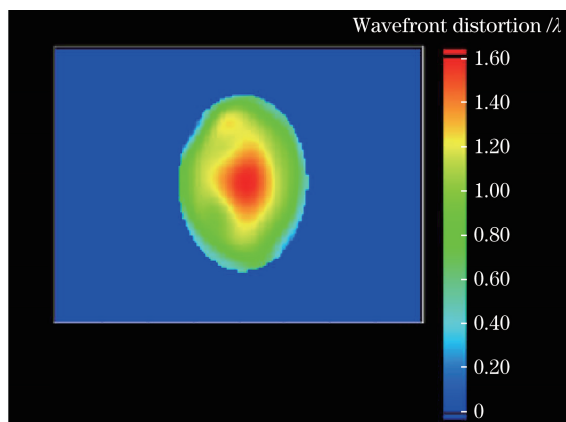


图 13 中心辐射结构冷却器的增益介质波前畸变

Fig. 13 Wavefront distortion of gain medium in central radiative structure cooler

5 结 论

研究了大尺寸薄片增益介质的高效冷却及畸变控制技术,针对高功率加载后薄片增益介质中心畸变过大的问题,提出了基于非均匀冷却的微通道复合射流冲击的流道设计思路。基于该思路完成了中心辐射结构冷却器的设计,并借助流-固-热耦合仿真,研究了不同流道结构参数对冷却器热致畸变的影响。主要结论如下。

1) 中心辐射结构微通道冷却器的换热性能略强于树形微通道冷却器,中心辐射结构可有效降低被冷却增益介质的中心高温区的峰值温度。

2) 采用局部强化散热的非均匀冷却技术思路,

通过对薄片增益介质的热致畸变突出区域进行散热强化,可实现热致波前畸变的有效控制。

3) 中心辐射结构微通道冷却器实现了增益介质温度场和应变场的中心对称分布,避免了高阶非对称相差,大幅降低了增益模块的波前畸变校正难度。

参 考 文 献

- [1] Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. *Applied Physics B*, 1994, 58(5): 365-372.
- [2] Yao Z Y, Jiang J F, Tu B, et al. 1.5 kW laser diode-pumped Nd: YAG disk laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 37-40.
姚震宇, 蒋建锋, 涂波, 等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd: YAG 薄片激光器 [J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 37-40.
- [3] Liu Y, Wang C, Tang X J, et al. Laser diode-pumped four Nd: YAG disks laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 1202007.
刘洋, 王超, 唐晓军, 等. 激光二极管抽运四片串联 Nd: YAG 薄片激光器 [J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1202007.
- [4] Lu F Y, Gong M L, Xue H Z, et al. Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(1): 43-48.
- [5] Liu Q, Fu X, Ma D, et al. Edge-pumped asymmetric Yb: YAG/YAG thin disk laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(10): 719-721.
- [6] Liao Y, Miller R J, Armstrong M R. Pressure tuning of thermal lensing for high-power scaling [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(19): 1343-1345.
- [7] Kemp A J, Millar P, Lubeigt W, et al. Diamond in solid-state disk lasers: thermal management and CW Raman generation [C]// *Advanced Solid-State Photonics 2009*, February 1 - 4, 2009, Denver, Colorado, United States. Washington, D. C.: OSA, 2009: WE7.
- [8] Mu J, Feng G Y, Yang H M, et al. District cooling method for thin disk-type laser media [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2527-2530.
母健, 冯国英, 杨火木, 等. 薄片激光介质分区域主动冷却方法 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2527-2530.
- [9] Yang H M, Feng G Y, Wei Y T, et al. Study on temperature distribution of disk-type laser based on heat-fluid-solid multiphysics coupling method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0902004.

- 杨火木, 冯国英, 魏泳涛, 等. 基于热-流-固多物理场耦合的薄片激光器温度场研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902004.
- [10] Yi J Y, Tu B, Cao H X, et al. Design and experiment on high-power direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201004.
易家玉, 涂波, 曹海霞, 等. 高功率直接液冷固体薄片激光器的设计与实验[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201004.
- [11] Ye Z B, Tu B, Wang K, et al. Research on the key technology for direct liquid-cooled thin-disk solid-state laser[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(5): 451-458.
叶志斌, 涂波, 王柯, 等. 基于液体直接冷却的薄片固体激光器研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(5): 451-458.
- [12] Guo J W, Jia K, Yang F, et al. Study of jet cooling on disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 011003.
郭嘉伟, 贾凯, 杨峰, 等. 薄片激光器喷流冷却技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 011003.
- [13] Guo J W, Jia K, Yang F, et al. Simulation and experiment of thermal characteristics of a jet cooling composite ceramic thin-disk laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 0314001.
郭嘉伟, 贾凯, 杨峰, 等. 喷流冷却复合陶瓷薄片激光器的热特性仿真分析及实验研究[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 0314001.
- [14] Cao J D, Cheng X J, Fan M, et al. Research on thermal effect compensation method of end-pumped thin-disk Yb: YAG lasers [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(2): 111-116.
曹健东, 程小劲, 范米, 等. 端面泵浦薄片激光器热效应补偿方法的研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(2): 111-116.
- [15] Cao J D, Wang Y, Cheng X J. Research on thermal lens effect and compensation method of water-cooling, thin-disk Yb: YAG laser [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(4): 357-361.
曹健东, 王媛, 程小劲. Yb: YAG 水冷薄片激光晶体热透镜效应及补偿方法研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(4): 357-361.
- [16] Wei Y T, Zhang Y M, Tang C, et al. Coupled analysis of temperature distribution in laser crystals pumped by repetitive pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 912-916.
魏泳涛, 张玉明, 唐淳, 等. 重复脉冲抽运下激光晶体温度场的耦合分析[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 912-916.

Cooling Techniques for Deformation Reduction of Thin-Disk Lasers

Jiang Lin, Liu Jun*, Yuan Xiaorong, Zhang Hao, Li Chunling, Cai Guangming

Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract

Objective Thin-disk lasers have become one of the main research targets in the high-power solid laser technology, owing to their short thermal conduction distance, which in turn causes a significant reduction in the thermal lensing effect. However, with the increase of pump caliber and pump power, the distorted wavefront caused by the increasingly serious thermal effect becomes one of the important factors restricting the output power and beam quality of laser. In this study, a new central radiative cooling structure is proposed. This structure satisfies the cooling requirements of thin-disk gain media and effectively reduces the thermal teratogenesis of gain media under a high-power loading. We hope that our basic strategy and findings can provide new approaches and ideas to achieve highly efficient cooling and distorted wavefront control of high-power thin-disk gain media.

Methods The thermal teratogenicity of a large thin-disk gain medium is considerably large. To overcome this drawback, the technical route of microchannel composite jet impingement based on nonuniform cooling was proposed. Based on the technical route, the design of the central radiative structure cooler was created. In the central region of the heat transfer, jet impingement reduced the thickness of the boundary layer to enhance heat transfer and reduce the central temperature and thermal teratogenicity of the gain medium through “peak-clipping”. The peripheral heat transfer runner was designed as a microchannel with a central radiative structure to guarantee the circumferential uniform distribution of flow field and realize the circumferential uniform cooling. Moreover, the effect of the different structure parameters on heat transfer performance and stress distortion in the gain medium was analyzed via the fluid-solid thermal coupling simulation. The performance comparison between the central radiative

structure cooler and the microchannel cooler was completed through simulation and experiment.

Results and Discussions The performances of the central radiative structure cooler and the original microchannel cooler are compared through simulation and experiment, respectively. The simulation results reveal that the heat transfer performance of the central radiative structure cooler is slightly better than that of the conventional microchannel cooler. Moreover, the surface temperature distribution of the gain medium with the central radiative structure cooler exhibits better circumfluence uniformity (Fig. 7 and Fig. 10). The axial deformation of the extraction region of gain medium surface with the microchannel cooler is $4.3 \mu\text{m}$. Additionally, the deformation distribution is asymmetric, which makes it easy to generate high-order asymmetric aberrations (Fig. 10). The axial deformation of the extraction region of the gain medium surface with the central radiative structure cooler is $1.2 \mu\text{m}$, and the circumferential uniformity is found to be better (Fig. 7). The experimental results reveal that the wavefront distortion of gain medium with the original cooler reaches 3.27λ under a full-power loading, whereas that of the gain medium with the central radiative structure cooler is reduced by more than 50% to 1.6λ (Fig. 12 and Fig. 13).

Conclusions Based on the idea of nonuniform cooling, the intensification of heat dissipation in the central region of the thin-disk gain medium can realize the effective control of thermally induced wavefront distortion. The cooler adopts the central radiative structure to realize the central symmetric distribution of temperature field and strain field of gain medium, avoid the generation of high-order asymmetric aberrations, and greatly reduce the difficulty in wavefront distortion correction of gain medium. The heat transfer performance of the microchannel cooler with a central radiative structure is slightly better than that of the conventional microchannel cooler. This can effectively reduce the peak temperature in the central high-temperature region of the cooled gain medium.

Key words lasers; thin-disk laser; micro channel; jet impingement; wavefront distortion

OCIS codes 140.3580; 140.6810; 140.3320