

高功率固体激光器微通道冷却结构的数值研究

吕坤鹏^{1,2*}, 刘震宇², 杨雪^{1,2}, 王柯^{1,2}

¹ 固体激光技术重点实验室, 北京 100015;

² 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015

摘要 针对端面泵浦固体激光器的微通道冷却结构, 基于流-固-热耦合的数值方法计算了不同冷却液流量下增益介质内部的温度分布和冷却结构的流动阻力, 为下一步冷却结构的改进提供了理论依据。计算结果表明: 当冷却液流量增加至 15 L/min 时, 增益介质的最高温度不再出现明显下降, 此时微通道冷却结构的内部流动阻力不会对冷却系统运行造成明显的影响; 冷却结构的进出口位置及水冷方向对增益介质内部的热分布具有较大的影响。

关键词 激光光学; 激光冷却; 固体激光器; 热效应; 微通道冷却; 数值计算

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0601010

Numerical Research on Microchannel Cooling Structure of High Power Solid-State Lasers

Lü Kunpeng^{1,2*}, Liu Zhenyu², Yang Xue^{1,2}, Wang Ke^{1,2}

¹ *Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China;*

² *The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China*

Abstract To develop a new microchannel cooling structure for end-pumped solid-state lasers, the temperature distribution of gain medium and flow resistance in the cooling structure were studied using the fluid-thermal-solid coupled numerical method, which provides a theoretical basis for optimization of the new cooling structure. Results show that there is no obvious decrease in maximum temperature of gain medium when the coolant flow rate increases to 15 L/min, and the flow resistance in the microchannel cooling structure at this flow rate does not dramatically influence the working condition of the cooling system. The inlet and outlet positions of the cooling structure and the flow direction greatly influence the temperature distribution of gain medium.

Key words laser optics; laser cooling; solid-state lasers; thermal effect; micro-channel cooling; numerical computation

OCIS codes 140.3320; 140.3580; 140.6810

1 引言

在激光器的发展历程中, 热效应问题一直是制约激光器向超高功率和优质光束质量方向发展的一个主要障碍。对于高功率固体激光器而言, 由于受到外部冷却影响, 以及泵浦光光强沿传输方向呈指数衰减^[1-3], 增益介质内部各个方向上均存在较大的温度梯度, 与之对应的热应力、热应变及增益介质折射率的改变最终导致激光输出功率和光束质量下降^[4-5]。

在端面泵浦的高功率板条激光器中, 板条被封装在两个金属冷却热沉之间, 受到封装结构的限制, 板条内部的温度分布无法测量, 这给板条热应变及由此造成的波前畸变的准确计算带来很大的困难。国内外的科研工作者纷纷基于数值传热学, 通过数值计算得到了不同热源和冷却条件下板条内部的温度分布。在众多文献中, 一部分仅建立了板条和冷却结构的局部模型, 无法完整研究整体流动结构对板条温度分布的影响^[6-7], 另一部分仅建立了板条的计算模型, 在给定板条表面恒定温度或恒定对流换

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-01-13; 录用日期: 2020-01-19

基金项目: 国防科技重点实验室稳定支持科研项目(JCKY2019210C002)

* E-mail: cetckply@163.com

热系数的边界条件下^[8-9],计算得出板条的热分布。然而,板条是一个非均匀分布的体热源,在冷却过程中受到冷却结构内部流体分布的影响时,其表面的温度和对流换热系数必然呈现为非均匀分布的结果,因此前述文献中的方法均无法得出准确的晶体内部温度分布结果。

本文建立了包含微通道热沉和增益介质的全尺寸计算模型,针对典型的板条内部非均匀热分布关系式,在给定冷却液入口温度和流量和的边界条件下,通过热-流-固耦合的数值计算方法得到板条表面和内部的温度分布,及热沉的整体压降,分析冷却结构对激光晶体热分布的影响,为下一步冷却结构的优化设计提供理论支持。本文的计算模型中含有完整的微通道区域,计算模型的结构和尺寸与实际模型完全一致,计算边界条件与实际完全一致,克服了其他文献中假定晶体表面温度或表面换热系数等

边界条件的简化算法的缺点,计算结果更能揭示微通道热沉结构及流场分布对晶体冷却效果的影响。

2 理论分析与数值计算

2.1 计算模型

本文建立了冷却液沿板条宽度方向流动的双面串联冷却结构的物理模型,模型中冷却水从板条一侧的下端入口进入热沉,从板条另一侧的下端出口流出热沉。计算的物理模型如图 1 所示,该模型沿板条的中心面呈左右对称,微通道中水流方向为板条的宽度方向,且板条左右两侧的水冷方向相反。为保证板条被充分冷却,同时避免对端头的影响,设计冷却结构的长度略小于板条的长度,宽度则大于板条的宽度。图 2 所示为计算模型中 Nd:YAG 板条的结构示意图,板条采用的是两端非掺杂、中间掺杂的复合结构。

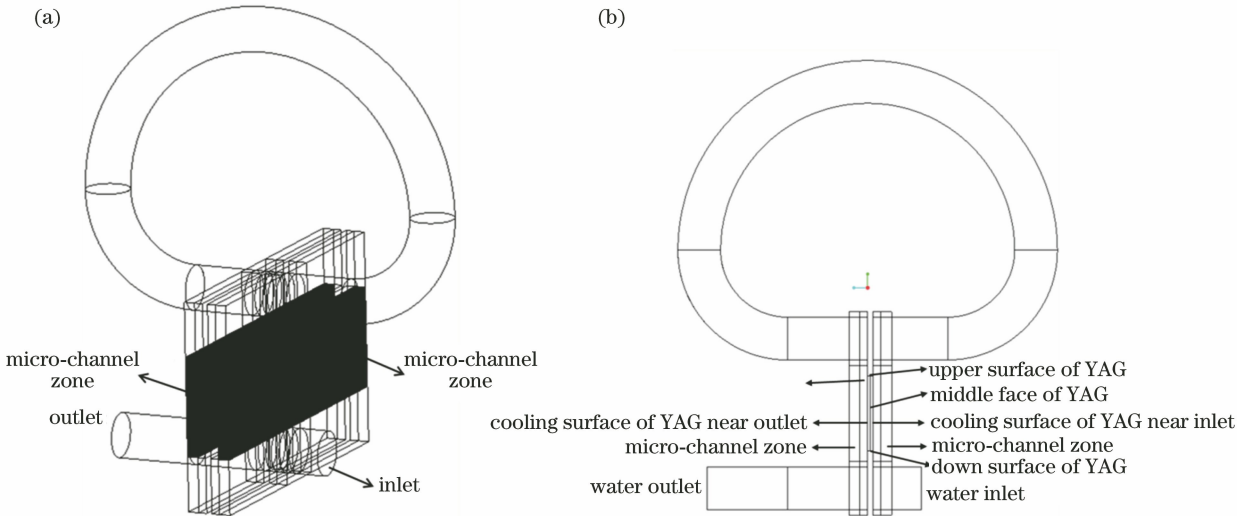


图 1 双面串联冷却结构的计算模型示意图。(a)等轴视图;(b)正视图

Fig. 1 Schematic of calculation model of two-sided tandem cooling structure. (a) Isometric view; (b) front view

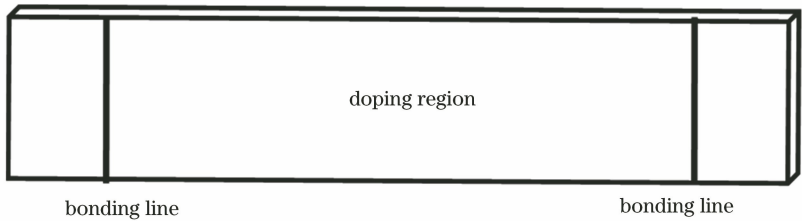


图 2 Nd:YAG 板条结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of Nd:YAG slab

2.2 板条热源分布

泵浦光光强在增益介质中沿传输方向呈现指数衰减,其中转化为热量的比例与增益介质的掺杂浓度和传输路径有关。双端泵浦的板条可视为一个产热量非均匀分布的体热源,体热源中热流密度的分

布关系式^[10]为

$$q = \frac{\eta_{\text{heat}} \alpha P}{wt} \{ \exp[-\alpha(x + L/2)] + \exp[-\alpha(-x + L/2)] \}, \quad (1)$$

式中: q 为泵浦光在增益介质内的热流密度; η_{heat} 为

泵浦光的光-热转换系数; P 为泵浦光功率; α 为增益介质对泵浦光的吸收系数; w 为板条的宽度; t 为板条的厚度; L 为总吸收长度; x 为吸收长度方向的坐标,以增益介质几何中心点为原点。

2.3 边界条件

由于较大的冷却液流量会导致流动阻力急剧上升,因此设定冷却液流量分别为 5, 10, 15, 20, 25 L/min,入口温度均为 25 ℃。对于单相强制对流换热,微通道内冷却液的流动形态对换热效果有着较大的影响,按照雷诺数的计算公式,在设定最大

流量为 25 L/min 时,微通道内的流动雷诺数为 857,尚未达到湍流的临界值^[11],因此所有计算模型中的流动按照层流模型进行计算。

相对于铜热沉而言,板条自身的导热系数极小^[12],板条自身热量扩散能力极弱,在空气自然对流时对流换热系数也较小;在晶体两个大侧面同时冷却的情况下,可认为板条中所有热量通过热沉被冷却液带走,板条的端头和上下两个小侧面可设定为绝热。计算中铜热沉及 Nd:YAG 板条的热物性参数如表1所示。

表 1 铜热沉及 Nd:YAG 板条热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of cooper heat sink and Nd:YAG slab

Parameter	Heat conductivity λ /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Specific heat C_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Density ρ /(kg·m ⁻³)
Cu	387.6	381	8978
Nd:YAG	14	590	4560

2.4 计算结果及分析

在不同冷却液流量下,本文分别计算了模型中晶体的温度分布及流体区域的压力分布,计算结果如表 2 所示。由表 2 中的计算结果可得,晶体两个

冷却面的局部温度远远高于冷却液的入口温度(25 ℃),这充分说明了其他文献中以冷却液的入口温度作为晶体冷却面的温度进而简化计算的方法存在不合理之处。

表 2 不同冷却液流量下的计算结果

Table 2 Computation results under different volume flow rates

Volume flow rate Q / (L•min ⁻¹)	Temperature difference	Max temperature	Max temperature	Max temperature	Pressure drop ΔP /kPa
	between inlet	on middle	on surface	on surface	
	and outlet	face of gain	of gain medium	of gain medium	
	ΔT /℃	medium T /℃	near inlet T_1 /℃	near outlet T_2 /℃	
5	15.63	108.78	54.93	61.00	7.5
10	7.73	104.02	50.73	53.79	17.2
15	5.17	102.49	49.41	51.49	28.1
20	3.86	101.70	48.76	50.34	41.1
25	3.09	101.25	48.41	49.66	55.5

图 3 所示为晶体中心面最高温度随冷却液流量的变化曲线。由图 3 可得,随着流量的增加,晶体中心面的温度逐渐下降。这是因为流量增加时,微通

道内的平均流速相应增加,较大的流速有助于减薄固体壁面附近的流动边界层,同时加强了流体内部的扰动,有效提高了微通道的对流换热系数,进而降低了晶体的最高温度。然而,冷却液流量的迅速增加并没有使晶体中心面的最高温度得到非常明显的改善,当流量大于 15 L/min 时,晶体中心面最高温度的降低速率明显减小。这主要是在热量从晶体向冷却液传递途径中,存在着晶体自身的导热热阻、晶体封装的接触热阻、微通道热沉基板的导热热阻,以及微通道内部的对流换热热阻,晶体自身的导热系数较小,在整个传热途径的热阻中占据了非常高的比例,而对流换热热阻和热沉基板的导热热阻则只占据了较小的比例,故当流量增加到一定程度后,继续通过提高冷却液流量来减小对流换热热阻,

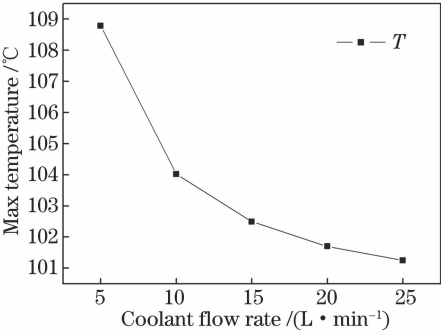


图 3 晶体中心面最高温度随冷却液流量的变化曲线
Fig. 3 Max temperature on middle face versus coolant flow rate

对总热阻的影响并不大。

图 4 为晶体两个冷却面的最高温度随冷却液流量的变化曲线。由图 4 可得,晶体两个冷却面的最高温度并不相同,随着冷却液流量增加,晶体两个冷却面的最高温度的差值逐渐减小。这是因为在两个冷却面相邻的微通道中冷却液的流动方向相反,沿着流动的方向,冷却液的温度逐渐升高,换热能力逐渐变差,故晶体两个冷却面的温度并不相等。在晶体的产热量恒定的情况下,随着冷却液流量增加,板条两侧冷却液的温差逐渐减小,对流换热系数也逐渐接近,故晶体两个冷却面的最高温度逐渐接近。

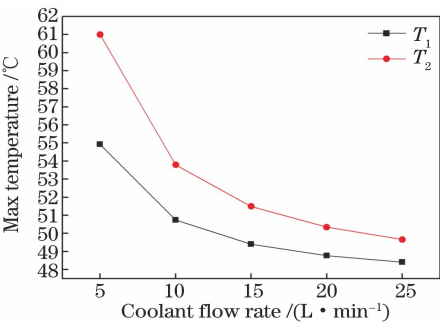


图 4 晶体两个冷却面最高温度随冷却液流量的变化曲线
Fig. 4 Max temperature of two cooling surfaces of crystal versus coolant flow rate

该计算结果充分说明了热沉内部的流场对晶体温度分布存在较大的影响。

在激光放大链路中,每一级放大器由 LD 泵浦源和晶体组成,冷却液从放大器的入口进入后,经分流装置分别流入 LD 泵浦源和晶体的冷却结构,最后汇集到一起从放大器的出口流出。在所计算的模型中,单个 LD 泵浦源的泵浦功率为 3000 W,电光效率约为 50%,冷却液流量一般为 9 L/min,则可得 LD 泵浦源进出口冷却液的温差为 4.8 °C。当板条内冷却液的流量为 15 L/min 时,板条冷却液的进出口温差为 5.17 °C,即从板条冷却结构流出的冷却液的温度与从 LD 冷却结构流出的冷却液的温度非常接近,二者汇集后在极短时间内即可混合均匀,这可以有效保证冷却系统回液温度的一致性,有利于冷却系统的高精度温控设计。因此在该泵浦功率下,板条冷却结构的冷却液流量应取 15 L/min。

流量为 15 L/min 时,板条中心面、入口侧冷却表面及出口侧冷却表面的温度分布如图 5 所示。从图 5 中可以明显看出,受到冷却液流动方向的影响,晶体两个冷却面的温度分布明显不同,入口侧晶体冷却面的高温区域位于板条上部分区域,出口侧板条冷却面的高温区域位于板条下部分区域。

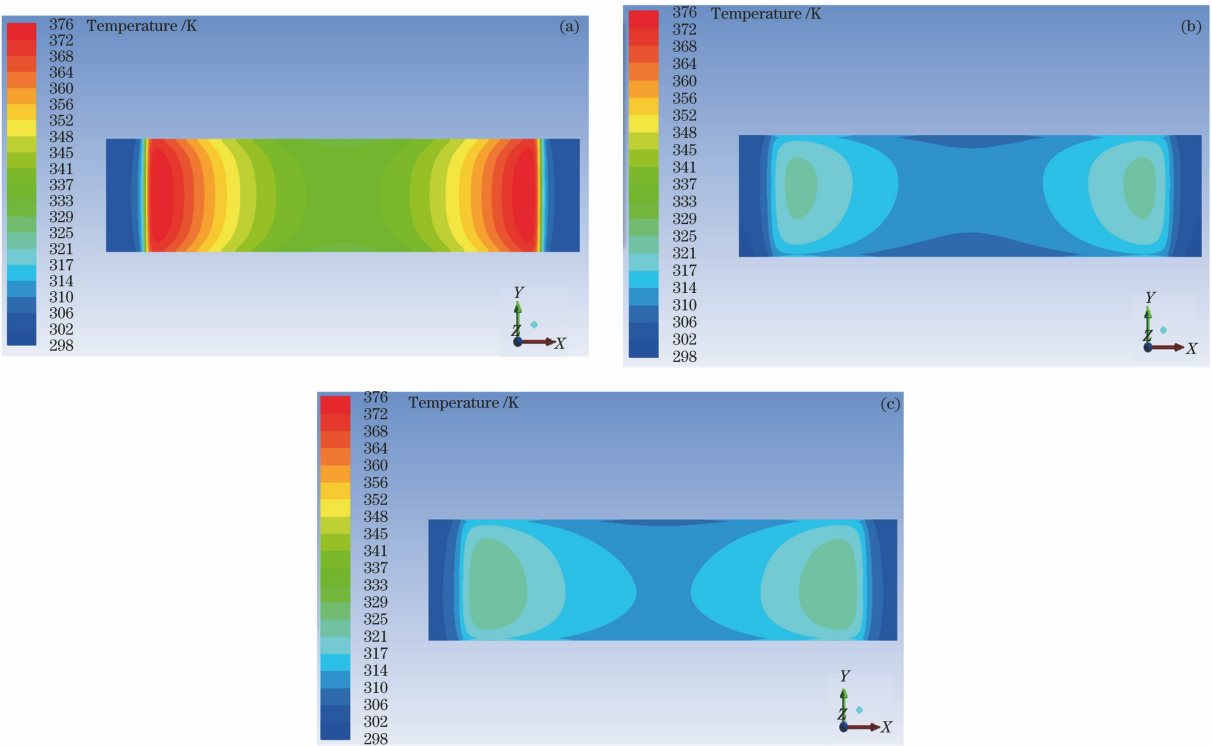


图 5 板条典型特征截面的温度分布云图。(a)板条中心面;(b)入口侧冷却表面;(c)出口侧冷却表面
Fig. 5 Temperature distributions of representative sections of slab. (a) Middle face of slab;
(b) cooling surface near inlet; (c) cooling surface near outlet

在板条掺杂区域的中心面上距离键合线 1, 2, 3, 4, 5 mm 处分别取一条直线, 命名为 a、b、c、d、e。所取直线均沿着板条宽度方向。图 6 所示为所取直线上板条的温度分布曲线, 可以看出, 所有曲线均呈现出中间温度高、左右两侧温度低的分布, 这主要是由于热沉的宽度大于晶体的宽度, 使得晶体上下两侧的散热效果远远优于晶体中心区域的散热效果。此外, 还可以看出在键合线后方 2 mm 的区域内板条长度方向存在着较大的温度梯度, 而板条内部最高温度在距离键合线 3 mm 的位置, 这充分证明了通过在体掺杂板条两端键合非掺杂的 YAG, 可以有效降低板条键合线附近的温度, 确保板条放大器的运行安全。

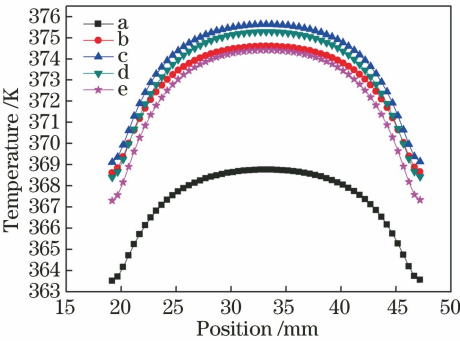


图 6 距离键合线不同位置处板条宽度方向上的温度分布曲线
Fig. 6 Temperature distribution curves in width direction of strip at different length from bonding line

在板条掺杂区域离键合面 3 mm 的平面上, 沿着板条厚度方向分别取距离出口侧板条冷却面 0.5 mm 和距离入口侧板条冷却面 0.5 mm 的两条直线, 分别命名为 m 和 n, 这两条直线以板条的中心面为对称面呈左右对称分布。图 7 所示为直线 m 和 n 上的温度分布曲线。从图 7 中可以看出: 这两条位置对称的直线上的温度并不相等, 越靠近入口侧, 板条的温度越低, 即板条厚度方向上的温度并不

是以板条中心面为对称面呈对称分布; 此外, 还可得到沿宽度方向距离入口侧板条冷却面 0.5 mm 处温度为下侧低上侧高, 距离出口侧板条冷却面 0.5 mm 处温度则为下侧高上侧低。这是由沿着流动方向冷却液温度逐渐升高造成的, 说明进出口的位置及水流方向对板条厚度方向上的温度分布影响较大, 这为下一步热沉的改进设计提供了参考。

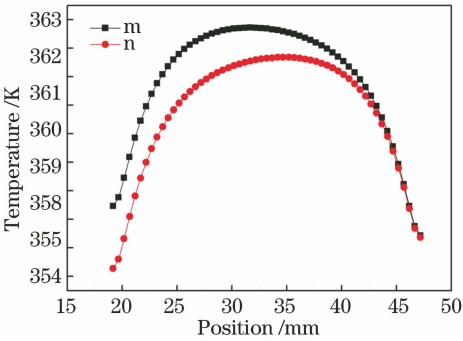


图 7 离键合面 3 mm 的平面上板条宽度方向上的温度分布曲线
Fig. 7 Temperature distribution curves in width direction of strip on plane 3 mm away from bonding surface

3 实验验证

由于封装后增益介质内部的温度无法直接测量, 只能通过红外热像仪测量晶体上表面的温度, 并与数值计算的结果进行对比, 以验证数值计算结果的正确性和合理性。温度测量采用的 FLIR 红外热像仪在 0~200 °C 范围内的测量误差为 5%。实际测试前, 将红外热像仪的测量发射率设置为晶体辐射率的 0.75, 测试在十万级恒温净化间中进行, 可忽视环境因素对测量的影响, 并确保测量角度小于 30°, 以期尽可能减小测量误差。

图 8(a)是用 FLIR 红外热像仪测量的板条上表面热像图, 图像显示最高温度为 95.4 °C, 图 8(b)为

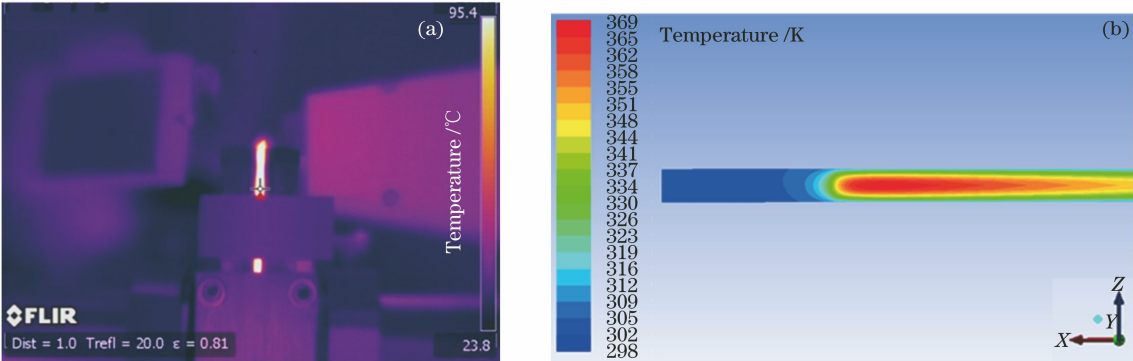


图 8 实验结果与数值计算结果对比图。(a) 板条上表面红外热像图; (b) 板条上表面数值计算温度分布云图
Fig. 8 Comparison of experimental result and numerical simulation. (a) Infrared thermal image of upper surface of slab; (b) calculated result of temperature distribution of upper surface of slab

本文计算模型中晶体上表面的温度分布云图,最高温度为 96.8 °C,数值计算结果和测量结果基本符合,说明了所选取的晶体热分布关系式基本符合实际的热分布,同时也验证了采用流-固-热耦合的数值计算方法可得出非常准确的晶体内部温度场分布结果。

4 结 论

本文建立了含有激光晶体和微通道热沉的全尺寸封装结构模型,通过对微通道内冷却液流量及换热特性进行数值计算,得到了非均匀热源分布下晶体的温度分布情况,并利用红外热像仪测量了激光放大实验中晶体上表面的温度分布,实际测量结果与数值计算结果基本一致,验证了数值计算具有较高的准确度。计算结果表明:激光晶体的冷却液流量并非越大越好,而是存在一个最佳值,为 15 L/min;此外,微通道内部的流场分布对晶体表层及内部的温度分布影响较大,充分证明了其他文献中不考虑流场而直接假设晶体表面恒定温度和表面恒定换热系数进行计算是不合理的。本文的计算结果可以为下一步固体激光器冷却结构的改进提供有力的数值依据和理论基础。

参 考 文 献

- [1] Zhan J J, Li J P, Wang R. Thermal effect in Nd:LuVO₄ crystal slab laser diode double-side pumped [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 607-611.
张建军, 李金平, 王锐. 激光二极管双侧泵平板 Nd:LuVO₄ 晶体热效应 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 607-611.
- [2] Yang H R, Zuo T C. Investigation on thermal effects and output of all-solid-state miniature Yb:YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 907-910.
杨鸿儒, 左铁钊. 全固体小型 Yb:YAG 激光器热效应及输出特性研究 [J]. *光子学报*, 2003, 32(8): 907-910.
- [3] Tian C Q, Xu H B, Cao H Z, et al. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1686-1692.
田长青, 徐洪波, 曹宏章, 等. 高功率固体激光器冷却技术 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1686-1692.
- [4] Geng Y G, Li L, Pan X R, et al. Thermal effect of variable thermal-conductivity circular Yb:YAG

crystal end pumped by pulse LD [J]. *Optical Technique*, 2017, 43(2): 103-107.

耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率圆片 Yb:YAG 激光器的热效应 [J]. *光学技术*, 2017, 43(2): 103-107.

- [5] Wang J L, Li L, Shi X C, et al. Modeling and optimization of cooling system for high power slab laser amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1553-1559.
王建磊, 李磊, 施翔春, 等. 高功率板条放大器冷却系统模拟及优化设计 [J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1553-1559.
- [6] Yang L Y, Li J Q, Zhang J Y, et al. Thermal effect of composite crystals solid state lasers pumped by diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(6): 742-746.
杨丽颖, 李嘉强, 张金玉, 等. 半导体激光泵浦复合晶体固体激光器的热效应 [J]. *发光学报*, 2017, 38(6): 742-746.
- [7] Guan L. Research on the thermal effects of Nd:YAG laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.
关丽. Nd:YAG 固体激光器的热效应研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [8] Zhang Z. Study of the micro-channel cooling technology for LD end-pumped solid state lasers [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
张震. LD 端泵固体激光器微通道冷却技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] Li F, Liu R, Bai J T, et al. Investigation on temperature and thermal lens effects of laser diode pumped composite YAG rods [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 101-104.
李锋, 刘蓉, 白晋涛, 等. LD 抽运复合 YAG 晶体温度场及热透镜效应研究 [J]. *激光技术*, 2008, 32(1): 101-104.
- [10] Wang M Z. Research on new cooling technology for thermal management of high power solid-state lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
王明哲. 高功率固体激光器热管理新技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [11] Jing S R, Zhang M Y. Fluid mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
景思睿, 张鸣远. 流体力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [12] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. 6th ed. New York: Springer, 2006.