

紧凑型中红外固体激光器散热性能分析

张 阔^{1,2}, 于德洋^{1,2}, 何 洋^{1,2}, 潘其坤^{1,2}, 陈 飞^{1,2*}, 李殿军^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电对抗技术创新研究室, 吉林 长春 130033

摘要 针对中红外固体激光器结构紧凑、抽运源模块温度要求严苛等引起的激光器散热难题, 采用强制对流冷却、半导体制冷与热管导热等多种方法相结合建立了激光器的散热系统。应用 COMSOL 有限元软件建立了紧凑型中红外固体激光器散热系统有限元模型, 利用温度传感器采集激光器侧壁和内部温度数据, 对比有限元计算结果验证了模型的有效性。基于此模型计算了在不同环境温度条件下如风扇转速、热管等参数对激光器散热结果的影响, 提高风扇转速、增加热管等方式可提高激光器散热效果, 并且随着环境温度升高, 散热效果改善明显。

关键词 激光器; 固体激光器; 温度分布; 强制对流散热; 热管

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0301002

Analysis on Cooling Performance of Compact Mid-Infrared Solid State Laser

Zhang Kuo^{1,2}, Yu Deyang^{1,2}, He Yang^{1,2}, Pan Qikun^{1,2}, Chen Fei^{1,2}, Li Dianjun^{1,2}

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²Innovation Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Cooling compact mid-infrared solid state laser is difficult for its compact structure and temperature restriction of laser pump module. A laser cooling system is proposed using forced convection cooling technique, thermo electric cooling technique and heat pipe technique. A finite element model for the laser cooling system is built with the COMSOL software. Temperature data is experimentally measured by sensors. The validity of this model is verified with the experimentally measured data. The effect of cooling system parameters, such as fan speed and heat pipe, on temperature distribution is numerically computed with the finite element model at different environmental temperatures. The results indicate that increasing the fan speed and installing the heat pipe are beneficial to improving the cooling effect, and the cooling effect is more obvious with the increase of environment temperature.

Key words lasers; solid state lasers; temperature distribution; forced convection cooling; heat pipe

OCIS codes 140.6810; 140.3070; 140.3580

1 引 言

3~5 μm 波段中红外激光在大气传输中衰减最小, 并且该波段涵盖了许多原子和分子的吸收峰, 因此该波段在激光雷达、探测、遥感、激光光谱学、大气监测等诸多领域有广泛应用。典型的中红外激光器有: 气体激光器、化学激光器、二极管激光器、稀土掺杂固体激光器和光参量振荡器(OPO)等。其中, OPO 具有调谐范围宽、全固化、结构紧凑和输出功率高等优点, 受到广泛关注和研究^[1-3]。工业用紧凑型 OPO 将抽运源模块和 OPO 模块集成于一个箱体内, 抽运源的电光转换效率为 20%~30%, 激光器运行过程中抽运源产生的

收稿日期: 2016-10-11; 收到修改稿日期: 2016-11-15

基金项目: 吉林省重大科技招标项目(20160203016GX)、吉林省重大科技攻关项目(20140203010GX)

作者简介: 张 阔(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率激光器方面的研究。E-mail: cole_fx@163.com

* 通信联系人。E-mail: feichenny@126.com

大量废热需及时散除,否则将引起激光器温度升高,激光波长漂移,输出功率降低,甚至使激光器失效。因此,需要对激光器采取有效的散热措施以保证激光器稳定工作。

随着激光器功率体积比增大,散热问题已严重制约激光器系统向小型化、高效化发展^[4]。水冷、风冷、半导体制冷、传导冷却和相变制冷等技术是激光器常用的散热方法。现有的高功率激光器主要采用水冷循环散热方式,水冷系统需外接冷水机,导致激光器体积庞大,不能满足激光器小型化需求^[5]。风冷散热基于对流换热原理,利用外加风扇强制气体快速流动移除激光器工作时的热量,目前工业用输出功率在 100 W 以下的半导体激光器和光纤激光器在输出时多采用风冷散热方式^[6]。半导体制冷器(TEC)应用于温控精度要求高的半导体激光器散热系统,通过匹配 TEC 制冷功率和激光器散热功率使激光器温控精度达到 0.05 °C^[7]。对于空间激光等特殊应用环境,传导冷却可将内部热源产生的热量传递至激光器侧壁等部位,保证核心元件温度满足正常工作要求^[8-9]。基于相变制冷原理制成的热管材料的热导率高于普通金属材料的热导率,随着热管技术的发展,低熔点液态金属代替无机盐等传统材料作为热管的工作介质,使得相变制冷的等效热导率变大,导热效果明显,相变制冷技术适用于温控精度要求高、热流密度大、体积受限及可靠性要求高的激光器^[4,10]。随着计算机仿真技术的发展,光机电系统的结构-传热耦合有限元仿真分析技术迅速发展^[11-12],该方法被应用于紧凑型固体激光器光机结构设计领域以优化激光器参数,提高激光器的工作稳定性^[13-14]。

本文针对紧凑型中红外固体激光器散热问题开展研究,综合强制对流冷却技术、半导体制冷技术及热管导热技术等建立激光器的散热系统;利用 COMSOL 有限元分析软件计算实验室条件下散热系统工作时激光器的温度分布,并实验验证所建立模型的有效性;基于模型计算风扇转速和热管等参数对激光器散热效果的影响。

2 紧凑型中红外固体激光器散热系统

以工业用紧凑型 OPO 为例研究中红外固体激光器的散热问题。图 1 表示紧凑型中红外 OPO 结构。抽运源模块、输出耦合模块和 OPO 模块集成一体。抽运激光通过输出耦合模块整合后注入 OPO 模块,经过 OPO 模块振荡输出 3.8 μm 闲频光和 1.47 μm 信号光。

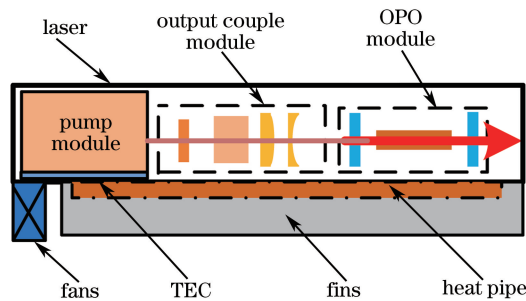


图 1 OPO 结构示意图

Fig. 1 Sketch of OPO

OPO 抽运模块所包含的半导体器件对温度有严格要求,在抽运模块外壁粘贴 TEC,将抽运模块温度控制在正常工作范围,TEC 工作过程中产生大量废热,废热通过机箱底面传导至激光器外,通过外部强制对流冷却等方式使激光器内部温度控制在传感器和光学元件可正常工作范围。机箱底部排布散热翅片以增大机箱的有效散热面积;散热翅片一端安装轴流风扇,风扇高速转动形成强制对流加快机箱底部区域空气流动,提高对流散热效率,同时在机箱底部安装热管,提高激光器内部热量的传导效率。

3 激光器散热模型

紧凑型中红外固体激光器散热是热传导、热对流及气体湍流流动等多物理场耦合过程。建立散热模型前需对激光器结构进行合理的简化,去掉倒角、螺栓安装孔等对散热影响微小的细节结构特征。根据介质的不同物理属性,激光器整体计算区域被分为 4 个区域,分别是激光器内部氮气区域,铝材质激光器箱体区域,激光器底部空气散热区域及热管导热区域。热量在 4 个区域内共轭传导。TEC 是激光器工作过程中主要热源,热量大小与激光器的环境温度有关,环境温度越高,热量越大。该热量作为热传导的内热源,通过激光

器箱体传导,计算温度 T 分布方程为

$$\rho C_p \partial T / \partial \tau = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

式中 ρ 表示箱体材料密度, C_p 表示箱体材料的比热容, k 表示箱体材料的热导率, τ 表示时间变量, Q 表示激光器工作时传入箱体的热量。激光器内部充氮气, 氮气与激光器内壁面进行热量交换, 由于温度变化引起的密度差异使氮气在激光器内自然流动。由于风扇使激光器底部空气产生强制冷却, 建模时根据风扇尺寸和工作参数设置风扇出口参数。在风扇作用下, 激光器底部空气高速流动, 形成强制对流冷却, 根据雷诺数方程

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (2)$$

结合底部结构判断空气的流动状态, 式中 v 表示空气流动速度, d 表示当量管径, ν 表示空气的运动黏度。经计算当风扇转速大于 3000 r/min 时, 激光器底部散热区域的空气处于湍流运动状态, 采用 $k-\omega$ 湍流模型模拟该区域空气的湍流运动状态。通过方程

$$\rho_a C_{pa} (\mathbf{U} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_a \nabla T), \quad (3)$$

计算对流散热引起的温度 T 变化, 式中矢量矩阵 \mathbf{U} 表示流体的运动速度, ρ_a 、 C_{pa} 和 k_a 分别表示空气的密度、比热容和热导率。根据文献[15]中对于热管建模的描述, 采用分段方式设置热管的散热系数, 在热管蒸发段热导率为 $5 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$, 热管冷凝段热导率为 $400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$ 。

4 实 验

为验证有限元模型的有效性, 搭建了激光器测温实验平台。在激光器有风扇一端的侧壁及对立侧壁的中心线与激光光轴高度一致的位置安装 2 个温度传感器, 测量激光器侧壁温度。在激光器内部中心线上、激光光轴高度、无热源及热控零件的位置, 安装温度传感器测量激光器内部氮气温度。设置风扇转速为 18000 r/min, 当环境温度分别为 25 °C 和 45 °C 时, 采集激光器稳定运行状态下 3 个传感器的温度数据, 实验参数及测量结果详见表 1。3 个传感器采集到的温度略有差异, 靠近风扇端的激光器外壁温度 T_1 最高, 氮气区域温度 T_2 较高, 而另一侧壁温度 T_3 最低。由于系统热源在激光器内部靠近风扇一侧, 并且激光器底部安装风扇, 热管无法传导此区域热量; 受安装风扇的位置影响, 此区域不能形成强制对流换热, 导致此区域散热效果较差, 因此 T_1 最高。随着散热系统中强制对流换热和热管等作用效果变明显, T_2 和 T_3 温度低于 T_1 。

表 1 温度测试实验参数和结果

Table 1 Experimental parameters and results of temperature measurement

Environmental temperature /°C	Fan speed /(r/min)	T_1 /°C	T_2 /°C	T_3 /°C
25	18000	32.5	31.2	29.7
45	18000	59.2	57.5	53.5

图 2 表示有限元计算的激光器温度分布与实验测量温度结果对比。安装风扇一侧的激光器侧壁温度最高, 沿侧壁厚度向内逐渐降低; 激光器内氮气区域温度基本一致; 另一侧壁温度由内向外逐渐降低。实验测量的 T_1 低于有限元计算结果, T_3 高于有限元计算结果, 产生这种现象是因为在测量激光器侧壁温度时将温度传感器紧贴激光

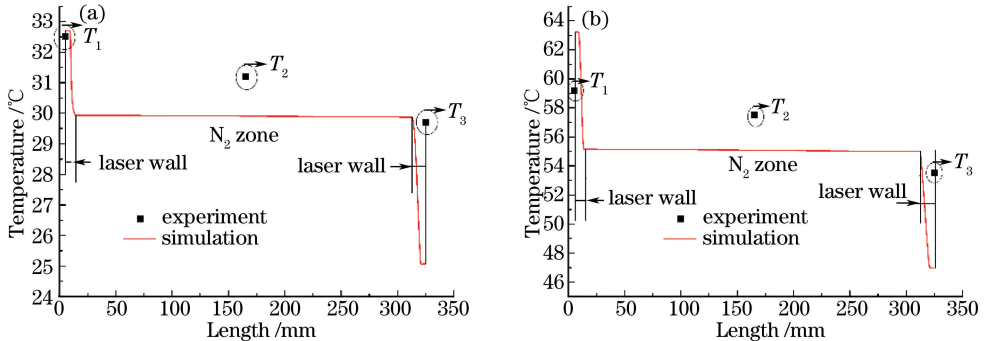


图 2 不同环境温度下激光器内部温度分布仿真结果与实验结果对比。(a) 25 °C; (b) 45 °C

Fig. 2 Comparison between experimental data and simulation results of temperature distribution in laser at different environmental temperatures. (a) 25 °C; (b) 45 °C

器侧壁,传感器用隔热材料与外部环境隔绝,所以实验测量侧壁温度与内部氮气温度较为接近。有限元计算温度与实验测量温度误差在 5% 以内,因此,该有限元模型可有效反映激光器工作过程的温度分布。

5 计算结果与讨论

5.1 风扇转速对散热效果的影响

由对流传热方程可知,改变气体流动速度可以改变对流换热的温度分布。根据激光器结构,当风扇转速大于 3000 r/min 时,激光器底部空气流场等效雷诺数大于 2300,即底部空气处于湍流运动状态。分别针对环境温度为 25, 35, 45 °C 三种情况,计算风扇转速由 4000 r/min 升高至 18000 r/min 时激光器内部氮气区域温度分布,如图 3 所示。随着风扇转速升高,氮气区域温度降低,当环境温度为 25 °C 时,最低转速与最高转速形成的温度差值为 4 °C;当环境温度为 35 °C 时,两者间温度差值为 6.2 °C;当环境温度为 45 °C 时,两者间温度差值为 8.4 °C。随着环境温度的升高,激光器内部氮气温度增高,氮气温度受风扇转速影响,相同环境温度下,风扇转速越大,氮气温度越低。环境温度越高,对应的风扇转速形成的温度差值越大,散热效果明显。

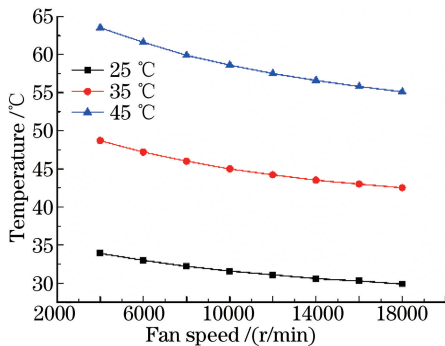


图 3 激光器内部氮气温度与风速的关系

Fig. 3 Relationship between temperature of N₂ in laser and fan speed

5.2 热管对散热效果的影响

热管具有良好的导热性能,热导率比铜、铝等导热性能良好的金属材料高若干数量级。热管吸热端吸收外部热量,管内工作介质气化后在微小压力差作用下向冷凝端流动,工作介质在冷凝端冷却液化,然后回流到吸热端。散热系统中热管的吸热端固定在机箱底部的热源位置,热管沿散热翅片安装。利用建立的有限元模型对比分析了热管对散热效果的影响。当温度分别为 25 °C 和 45 °C,风扇转速为 18000 r/min 时,分别计算安装热管和不安装热管两种状态下激光器箱体内氮气温度,如图 4 所示。当安装热管时,激光器箱体内氮气温度明显降低,环境温度为 25 °C 时,两者间温差接近 2.7 °C;当环境温度为 45 °C 时,两者间温差增加至 10 °C。热管加速了激光器箱体内热量的向外传导,降低了内部氮气的温度。当环境温度升高时,激光器内部散热量增大,热管导热作用更为明显,氮气温度显著降低。

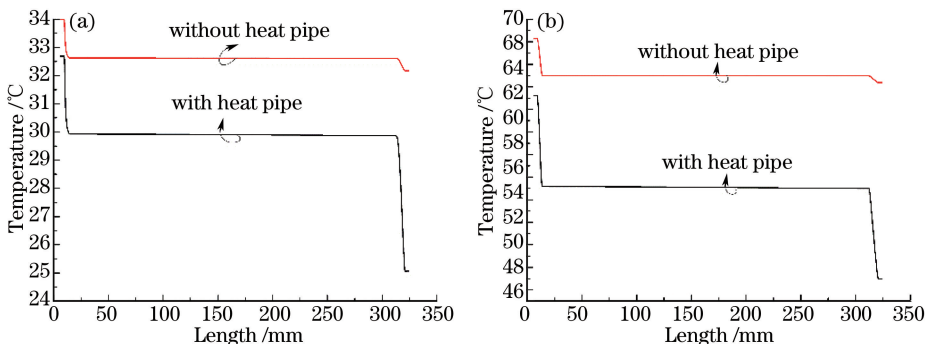


图 4 不同环境温度下热管对激光器内部氮气温度影响。(a) 25 °C; (b) 45 °C

Fig. 4 Influence of heat pipe on the temperature of N₂ in the laser at different environmental temperatures. (a) 25 °C; (b) 45 °C

6 结 论

结合紧凑型中红外固体激光器——OPO 的结构特点,建立了综合传导散热、强制对流散热和热管散热等方式的散热系统以满足激光器高温工作需求。利用 COMSOL 软件建立了散热系统的有限元模型,并实验验证了模型的有效性。基于该模型分别计算了在 25,35,45 °C 下风扇转速对散热效果的影响,随着风扇转速的升高,激光器内部温度显著下降;环境温度越高,风扇转速对散热效果影响越明显。计算了热管对散热效果的影响,热管使激光器内部温度显著降低,环境温度越高,安装热管的散热系统降低激光器温度的效果越显著。

参 考 文 献

- [1] Zhao Jiaqun. Study on mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator technique based on MgO:PPLN crystal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 1-4.
赵家群. 基于 MgO:PPLN 的中红外连续波光学参量振荡器技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 1-4.
- [2] Chang Jianhua, Yang Zhenbo, Lu Zhou, *et al.* A novel multi-wavelength mid-infrared difference frequency generation laser source based on PPLN[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002009.
常建华, 杨镇博, 陆 州, 等. 一种新型的基于 PPLN 的多波长中红外激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002009.
- [3] Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin, *et al.* High-power MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1447-1450.
魏星斌, 彭岳峰, 王为民, 等. 高功率 MgO:PPLN 光参变振荡器[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1447-1450.
- [4] Cheng Yong, Guo Yanlong, He Zhizhu, *et al.* Application research of phase change material heat removal technology for compact high efficiency diode pumped laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0102005.
程 勇, 郭延龙, 何志祝, 等. 相变散热技术在小型高效半导体抽运激光器中的应用研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0102005.
- [5] Liu Gang, Tang Xiaojun, Xu Liujing, *et al.* Fluid-solid coupled heat transfer design numerical study for water cooling CCEPS laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402004.
刘 刚, 唐晓军, 徐彦婧, 等. CCEPS 激光器水冷设计的流-固耦合传热数值研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402004.
- [6] Zhang Zhijun, Liu Yun, Fu Xihong, *et al.* Analysis of air-cooled heat system in hundred-watt level semiconductor laser module[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(2): 187-191.
张志军, 刘 云, 付喜宏, 等. 百瓦级半导体激光器模块的风冷散热系统分析[J]. 发光学报, 2012, 33(2): 187-191.
- [7] Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, *et al.* High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1745-1749.
李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [8] Xie Yin, Meng Junqing, Zu Jifeng, *et al.* Conduction cooling and compact, high peak-power, nanoseconds pulse laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902005.
谢 银, 孟俊清, 祖继峰, 等. 传导冷却结构紧凑型高功率纳秒级激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902005.
- [9] Ni Yuxi, Jing Hongqi, Kong Jinxia, *et al.* Thermal performance of high-power semiconductor laser packaged by ceramic submount[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(5): 561-566.
倪羽茜, 井红旗, 孔金霞, 等. 高功率半导体激光器陶瓷封装散热性能研究[J]. 发光学报, 2016, 37(5): 561-566.
- [10] Song Xiaolu, Wei Guang, Wen Jianguo, *et al.* Application of heat pipe in LD end-pumped solid-state laser cooling system[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(3): 397-401.
宋小鹿, 韦 光, 文建国, 等. 热管在 LD 端面泵浦固体激光器散热系统中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(3): 397-401.
- [11] Xiao Yang, Xu Wendong, Zhao Chengqiang. Integrated simulation of opto-mechanical system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722002.
肖 阳, 徐文东, 赵成强. 光机系统的一体化仿真分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722002.
- [12] Liu Ming, Zhang Guoyu, Geng Shubin, *et al.* Opto-mechanical structure design and thermal optical analysis on zoom lenses of optical-electronic platform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0812003.
柳 鸣, 张国玉, 耿树彬, 等. 光电平台变焦镜头光机结构设计及热光学分析[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0812003.

- [13] Quan Wei, Li Guanghui, Chen Xi, *et al.*. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1080-1086.
全 伟, 李光慧, 陈 熙, 等. 一体化半导体激光器的 ANSYS 热仿真及结构设计[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(5): 1080-1086.
- [14] Hu Zhitao, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080002.
胡志涛, 何 兵, 周 军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080002.
- [15] Liu Hong, Tong Sicheng, Jiang Lanfang. Numerical simulation model for radiator with heat pipe[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(2): 194-196.
刘 红, 童思成, 蒋兰芳. 热管散热器数值仿真模型[J]. *半导体光电*, 2012, 33(2): 194-196.