

大功率空间全固态激光器高效传导冷却技术研究

刘 丹 谢可迪 马秀华 朱小磊 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 采用全新设计的大功率微重力热管,对大功率空间全固态激光器实施高效传导冷却,实现了对激光放大器废热的有效耗散,获得高光束质量、高功率的激光输出。鉴于激光板条放大器的主要热源为抽运激光二极管(LD)叠层及板条增益介质,实验设计了新型放大器散热结构,分别采用单通道和并行双通道微重力热管对两级串接放大器进行散热实验。结果表明,两级放大器热沉的温度均可稳定在设定的 LD 工作温度范围内,获得平均功率大于 20 W,放大倍数大于 20 倍,光束质量因子 M_x^2, M_y^2 控制在 1.42 和 1.31 的激光脉冲输出。

关键词 激光器;空间激光器;传导冷却;热管传输;板条放大器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702016

Study of High-Efficiency Conduction Cooling Technique for High Power Space-Based All-Solid-State Lasers

Liu Dan Xie Kedi Ma Xiuhua Zhu Xiaolei Chen Weibiao

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The novel high power micro-gravity heat pipes are applied for the conduction cooling of a high power and high repetition space-based all-solid-state laser. The waste heat of laser amplifiers can be dissipated effectively and thereby the laser output with high beam quality and high power is obtained. In view of the pumping laser diode (LD) stacks and slab gain medium being major thermal sources in slab amplifiers, the novel amplifier structures for heat dissipating are designed. In the experiment, the heat-sinking capability of two stage simulated amplifiers in series is measured with the single-channel micro-gravity heat pipe and the two-channel micro-gravity heat pipe, respectively. The experimental results show that the temperature of both stage pre-amplifiers stabilizes in the range of operating temperature for the laser diode array. In the end, the average output power more than 20 W, magnification times greater than 20, M_x^2 of 1.42 and M_y^2 of 1.31 are achieved successfully.

Key words lasers; space-based laser; conduction cooling; heat pipe transmission; slab amplifiers

OCIS codes 140.3580; 140.3280; 140.6810

1 引 言

空间激光器是空间激光雷达、空间激光通信等应用系统的核心单元,随着半导体激光器技术的飞速发展,激光二极管(LD)抽运的全固态激光器因其结构紧凑、效率高、寿命长、功耗低、稳定性好等优点,在目前的空间激光雷达系统中得到了广泛的应用^[1~5]。由于空间应用的特殊性及其环境的严酷性,研制具有高可靠性的高重复频率、大功率空间激光器对于科学探索、大气探测和地球环境监测等方面

都具有极为重要的应用前景,已成为当前世界各国争相研究的热点。目前国外在空间激光器技术研究上具有代表性的工作有,美国 FiberTek 公司于 2008 年研制的星载单频全固态激光器,其重复频率已达到 200 Hz,1064 nm 波长激光输出功率达到 20 W,即单脉冲能量达到 100 mJ,光束质量因子 $M^2 < 2$ 。而欧洲太空局即将发射的多普勒测风激光雷达(ALADIN)则将是目前国际上输出功率最大的星载激光器^[6,7],其重复频率高达 100 Hz,1064 nm

收稿日期: 2010-12-30; 收到修改稿日期: 2011-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(60678016)和上海市科学技术委员会(08DZ2230400)资助课题。

作者简介: 刘 丹(1979—),女,博士,高级工程师,主要从事全固态激光器结构设计与分析等方面的研究。

E-mail: danmeier209@siom.ac.cn

基波能量接近 400~500 mJ, 355 nm 输出能量大于 150 mJ, 平均功率接近 50 W。而我国在开展同等指标的高重复频率、大功率激光器研究方面, 处于起步阶段。制约该项研究快速发展的一个至关重要的因素就是该类型激光器在工作过程中会产生大量的废热, 激光晶体内部严重的废热将导致晶体热聚焦、热致双折射及退偏振等热效应, 进而对输出功率和光束质量造成极其严重的影响^[8~10]。因此, 高效的激光器散热结构设计将成为提升空间激光器功率水平的核心技术之一。由于在空间环境下传统的液体循环冷却方式无法采用, 因此, 传导冷却和热管传输技术被认为是激光器空间制冷的有效手段^[11]。

本文介绍了一种可应用于大功率空间全固态板条激光器的高效传导冷却技术。板条激光器的废热主要集中在抽运 LD 及板条晶体上, 通过设计合理的板条放大器散热结构, 采用传导冷却和热管传输的方式, 实现了对板条激光器抽运 LD 及激光板条晶体的有效散热, 最终获得了高功率和高质量的激光输出。

2 板条放大器散热结构设计

传导冷却板条激光器由激光振荡器和两级放大器组成, 放大器分别标示为 Amp1 和 Amp2。放大器的板条 Nd:YAG 晶体采用双面对称抽运、双面对称冷却组合方式。激光增益介质选用 Nd:YAG 晶体板条, 晶体板条两个端面切割成布儒斯特角以抑制寄生振荡。晶体板条采用 bounce 抽运方式, 即 LD 布置在晶体板条内全反射点处, 从反射面的两个相对的方向进行光抽运。该种抽运结构既能提高抽运利用效率, 又可以有效补偿热效应, 并且能减小由于边缘衍射效应对提取能量的影响。晶体冷却则采用双侧面传导冷却结构设计, 可提高散热面积, 减轻晶体的热畸变和热透镜效应。冷却面与抽运面分离的结构设计可以降低对 Zig-Zag 反射面膜层的要求, 提高可靠性。实验设计的单个激光放大器头部的机械模装图如图 1 所示。

放大器安装时, 将侧面的抽运 LD 分别安装在对应的 LD 铜热沉上, 晶体板条分别与上热沉和下热沉的冷却面接触, LD 热沉与晶体板条热沉设计成紧密装配, 最大限度地减少界面热阻。每侧 LD 热沉的背面都安装有一根热管。由于 LD 产生的废热远远大于晶体板条产生的废热, 所以, 放大器设计的散热路径是首先将 LD 的热量快速传导到其铜热沉上, 而晶体的废热则先传导到晶体热沉上, 再通过

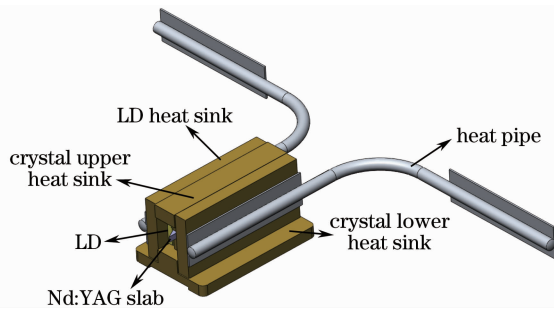


图 1 传导冷却放大器结构

Fig. 1 Structure of conductively-cooled amplifier

接触界面传导到 LD 铜热沉上。最终 LD 和晶体产生的总废热传导到安装在热沉上的热管上, 由热管将热功耗传导到外界辐射冷板上, 将废热耗散。为达到快速传导散热目的, 结构设计上采取了特殊的技术措施: 1) LD 热沉和晶体热沉均采用具有高热导率的铜质材料, 其表面进行严格的防氧化处理; 2) LD 与热沉接触界面、板条晶体上下表面与热沉的接触界面以及热沉与热管间接界面均达到精密加工, 确保装配良好, 以减少接触热阻; 3) 晶体板条与热沉的两个冷却面之间填充导热率较高、质地较软的钢皮层, 最大限度地减少界面热阻。

3 放大器结构热分析

放大器稳定运行时处于稳定传热状态。热稳态系统的净热流率为零, 即系统自身产生的热量加上流入系统的热量等于流出系统的热量。利用有限元软件进行稳态热分析时, 放大器头部任一节点的温度不随时间变化。

稳态热分析遵循的能量平衡方程用矩阵形式表示为

$$KT = Q, \quad (1)$$

式中 K 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数; T 为温度向量; Q 为节点热流率向量, 包含热生成。给定放大器模型几何参数、热流量以及所施加的边界条件, 利用有限元分析 (FEA) 可计算得到放大器内部的温度分布。

在热管具有完全导热能力的前提下, 只要使 LD 和晶体产生的热量能及时快速地导到热管的界面上, 就能够保证废热有效耗散。换句话说, 如果 LD 热沉及晶体热沉工作时不存在显著温度梯度变化, 就可认为两者热沉热传递能力足够。放大器工作时, 每级放大器总热量均约为 150 W。这里以第一级放大器为例, 来说明热分析过程。

图 2(a) 为放大器头部的热分析模型示意图, LD

和晶体构成放大器的主要热源,热流方向如箭头所示。由于放大级头部的结构设计对称性,选取了整体结构的一半进行热分析。两级放大器板条晶体的尺寸均为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 120\text{ mm}$,掺杂长度约为 100 mm 。晶体热沉较细部分尺寸为 $5\text{ mm} \times 12.8\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,较宽部分尺寸为 $12\text{ mm} \times 21.8\text{ mm} \times 120\text{ mm}$; LD 热沉尺寸为 $12.4\text{ mm} \times 54.6\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 。放大器单侧安装 LD 的安装面的热流密度 q_1 为 20 kW/m^2 ,晶体安装面的热流密度 q_2 为 30 kW/m^2 。LD 热沉与热管的贴合面边

界温度设为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,图中阴影部分表示晶体与其热沉、LD 与其热沉、LD 热沉与晶体热沉以及 LD 热沉与热管之间界面的接触热阻,当标称压强不小于 2 MPa ,表面粗糙度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,铜与铜接触界面的传热系数约为 $5.55 \times 10^4\text{ W/(m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$;在同等条件下,界面之间垫钢箔后传热系数提高 $5\sim 6$ 倍^[12,13]。利用有限元软件 ANSYS 计算得到的放大器头部热沉的温度分布如图 2(b) 所示。由图可见,放大器热沉内部的最大温度为 $24.2\text{ }^\circ\text{C}$,温度梯度仅为 $2.2\text{ }^\circ\text{C}$,说明理论上放大器热沉散热能力是足够的。

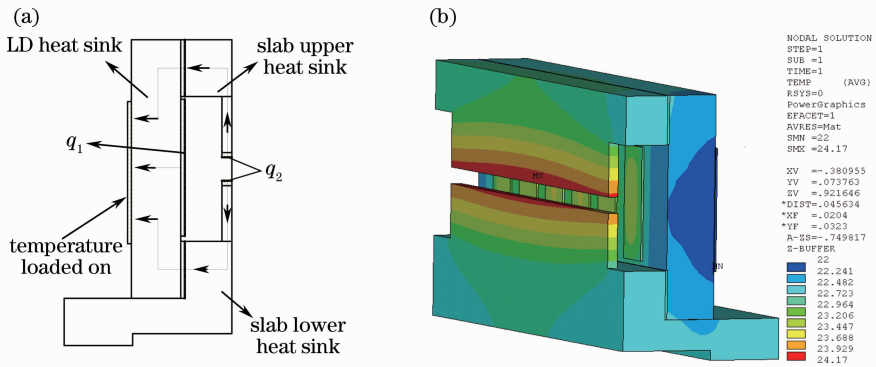


图 2 (a)热分析模型示意图;(b)有限元分析所得放大器热沉温度分布云图

Fig.2 (a) Schematic diagram of thermal analysis model; (b) temperature distribution of the heat sink of the amplifier calculated by FEA

4 实验结果与分析

激光放大器实验装置如图 3 所示。由于放大器双侧产生的热量是相同的,因此,仅需对放大器单侧的散热能力进行测量即可。为有效降低接触界面热阻,提高散热性能,在热管和热沉的接触面之间填充了钢箔。热交换器为一内部通水冷却的紫铜平板,用于模拟热交换辐射冷板。首先用模拟热源对结构散热能力进行验证,即在每个放大器安装 LD 的位置上,安装有额定最大热功率为 30 W 的热电阻,热电阻产生的总热功率与 LD 和晶体产生的总热量等效。实验过程中,分别采用上海卫星工程研究所研制的单通道微重力热管和双通道并行微重力热管对放大器进行散热实验,并对两种类型热管的散热能力进行对比。其中单通道热管的热管法兰宽度为 30 mm ,与热交换器接触面积大小为 $30\text{ mm} \times 400\text{ mm}$;双通道热管的热管法兰宽度为 40 mm ,与热交换器接触面积大小为 $40\text{ mm} \times 400\text{ mm}$;环境温度保持在 $23\text{ }^\circ\text{C} \sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,热交换器水温设定在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。测温点设在热电阻的热沉上。

图 4(a)为单通道热管对两级放大器共 240 W

电热功率进行散热时得到的放大器热沉温度变化曲线。两放大器热沉温度均稳定在 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,且两者温差小于 $1.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验中,当进一步增大热功率输入时,两放大器热沉的温度会上升,且两者温差加大。由此可见,该单通道热管的最大导热能力约为 240 W 。而两级激光放大器单侧的总热量约为 150 W ,因此,用此类型单通道热管能够对两级放大

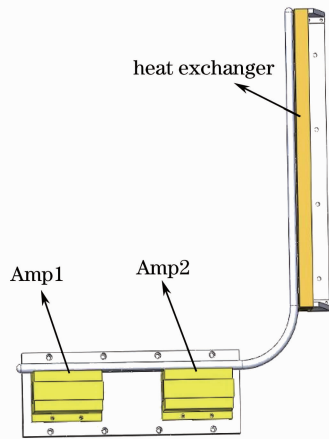
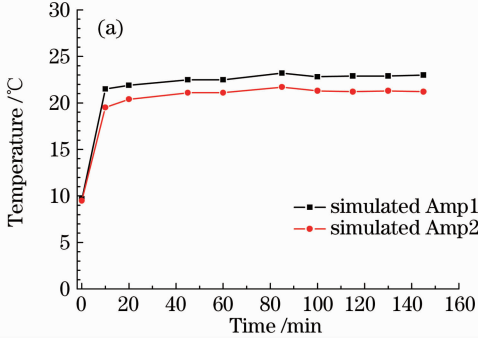


图 3 激光放大器实验装置

Fig.3 Experimental setup of laser amplifiers

器实现稳定热控。

图 4(b) 为双通道并行热管对两级放大器共 361 W 电热功率进行散热时得到的放大器热沉温度变化曲线。两放大器热沉温度均能稳定在 22 °C 左右, 且两者温差小于 0.5 °C。实验中, 当进一步增大热功率输入时, 两放大器热沉的温度会上升, 且两者



温差加大。由此可见, 该双通道并行热管的最大导热能力约为 360 W, 双通道热管的导热能力明显高于单通道热管, 能满足放大器散热要求。在激光放大器设计时, 最终用两根双通道并行热管将两级放大器串接到一起。

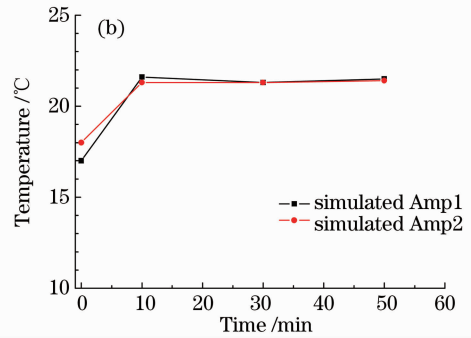


图 4 两级放大器接(a)单通道和(b)双通道热管后的温升曲线

Fig. 4 Temperature curve of two amplifiers connected with the (a) single-channel and (b) double-channel heat pipe

最后, 实验对双通道热管连接的两级放大器正常工作时的温度分布进行了测量, 当环境温度为 20 °C 时, 热交换器水温设定在 18 °C, 测得放大器 LD 热沉温度梯度在 1 °C 以内, 并能实现长时间稳定。可见, 实验结果与图 3 给出的理论热分析结果基本吻合, 验证了上述放大器结构设计的合理性。

激光振荡器输出的 1 W 激光脉冲, 经两级板条放大器放大后, 输出激光的平均功率达到 20 W, 实现放大倍数 20 倍的目标, 放大器提取效率为 12%, 放大后的输出功率曲线如图 5 所示。由 M^2 测量仪测得的光束质量结果如图 6 所示, 放大后激光脉冲

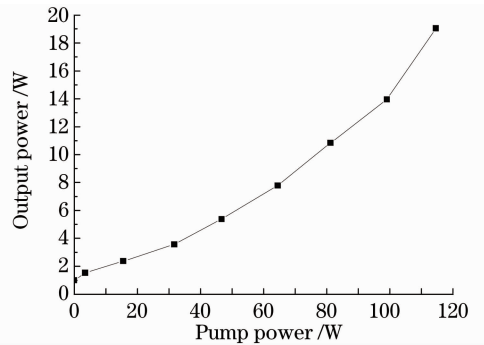


图 5 经两级放大器后所得输出功率曲线

Fig. 5 Output power versus pump power of Amp1 and Amp2

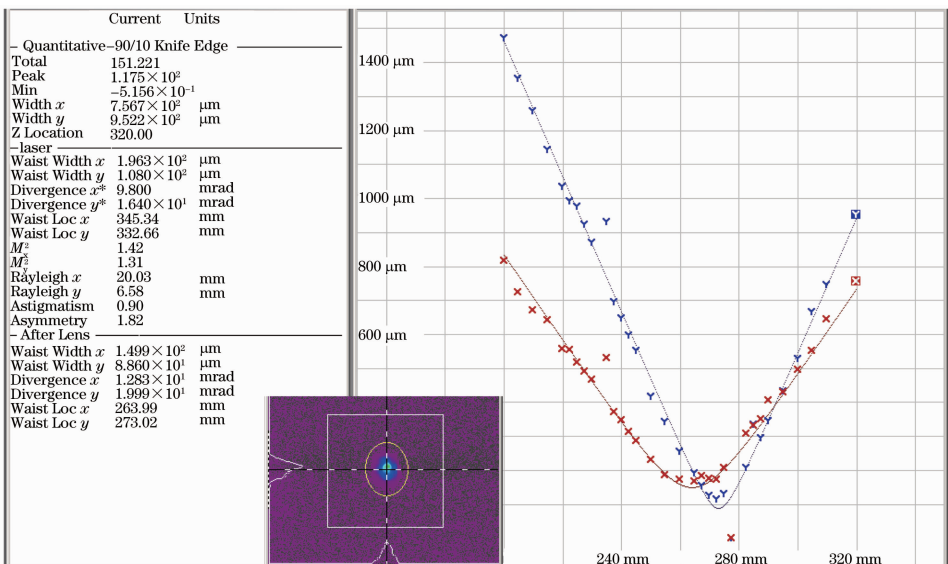


图 6 输出激光光束质量

Fig. 6 Beam quality of output beam

输出光束质量因子 M_x^2 为 1.42, M_y^2 为 1.31。可见双通道热管传导冷却的板条放大器系统, 晶体板条的热畸变对放大光束光束质量的影响非常有限, 实现了高放大效率、高光束质量光束输出的设计要求^[14~16]。

5 结 论

针对大功率、高重复频率空间全固态激光器运转过程中存在的严重废热耗散问题, 提出了一种高效的传导冷却和热管传输相结合的散热方法。设计的激光放大器中采用导热性能优越的双通道并行热管直接对 LD 阵列和板条晶体热源进行散热, 成功地实现了对放大器头部温度控制。实验结果表明, 设计的放大器散热结构具有良好的热传导能力。

致谢 对上海卫星工程研究所在本文完成过程中提供热管装置表示衷心感谢。

参 考 文 献

- R. S. Afzal. Mars observer laser altimeter; laser transmitter[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3184~3188
- D. J. Krebs, A. M. Novo-Gradac, S. X. Li *et al.*. Compact, passively Q-switched Nd:YAG laser for the messenger mission to mercury[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1715~1718
- B. M. Gentry, Huailin Chen. Tropospheric wind measurements obtained with the goddard lidar observatory for winds (GLOW): validation and performance[C]. *SPIE*, 2002, **4484**: 74~81
- L. Ramos-lzquierdo, V. Stanley Scott III, S. Schmidt *et al.*. Optical system design and integration of the mercury laser altimeter[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1748~1760
- L. Ramos-lzquierdo, J. L. Bufton, P. Hayes. Optical system design and integration of the mars observer laser altimeter[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 307~322
- Y. Durand, R. Meynart, M. Endemann *et al.*. Manufacturing of an airborne demonstrator of ALADIN, the direct detection Doppler wind lidar for ADM-aeolus [C]. *SPIE*, 2005, **5984**: 598401
- R. Krawczyk, J. B. Ghibardo, J. Y. Labandibar *et al.*. ALADIN: an atmospheric laser Doppler wind lidar instrument for wind velocity measurements from space [C]. *SPIE*, 1995, **2581**: 178~189
- E. Armandillo, C. Norrie, A. Cosentino *et al.*. Diode-pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(15): 1168~1170
- Zhu Guangzhi, Zhu Xiao, Zhu Changhong *et al.*. Thermal effect study of LD edge-pumped slab lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 37~42
朱广志, 朱 晓, 朱长虹 等. LD 侧边抽运板条激光器的热效应 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 37~42
- Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858
程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858
- Jianlei Wang, Liang Yin, Xiangchun Shi *et al.*. Theoretical analysis of amplification performance of space-based lasers with different pump configurations [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(6): 591~594
- Ren Hongyan, Hu Jingang. Thermal contact resistance and thermal conductive filler [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, (6): 11~15
任红艳, 胡金刚. 接触热阻与接触导热填料 [J]. *宇航材料工艺*, 1999, (6): 11~15
- Zhao Lanping, Xu Lie, Li Zhaoci *et al.*. Mechanism and application research on thermal contact heat transfer between solid interfaces [J]. *Cryogenics*, 2000, (4): 29~34
赵兰萍, 徐 烈, 李兆慈 等. 固体界面间接触导热的机理和应用研究 [J]. *低温工程*, 2000, (4): 29~34
- T. T. Hoang, T. A. O'Connell, J. Ku *et al.*. Design optimization of a hydrogen advanced loop heat pipe for space-based IR sensor and detector cryocooling [C]. *SPIE*, 2003, **5172**: 86~96
- Liu Jia, Fu Wenqiang, Hu Qiquan. Dynamic thermal aberration measurement of side-pumped slab laser medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 511~514
刘 佳, 付文强, 胡企铨. 侧面抽运板条激光介质动态热畸变测量方法 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 511~514
- Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Thermal distortion analysis for conduction cooled end-pumped slab [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 987~992
刘 亮, 郭少锋, 陆启生 等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 987~992