



·激光器件·

1.2 kW 便携式光纤激光器*

张利明, 张 昆, 赵 鸿, 孙儒峰, 龙润泽, 朱 辰,
宋奎岩, 李 尧, 余 洋, 周寿桓

(中国电子科技集团公司第十一研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 高功率光纤激光器通常采用如水冷散热方式进行控温, 难以满足轻量化等的需求。而利用相变储能材料的特性, 采用多相变控温技术, 可大幅减小高功率光纤激光器系统的体积、重量。对光纤激光器的温控技术进行了分析, 采用多相变温控技术, 实现了波长 1.08 μm 、最大功率 1.26 kW 的全光纤激光输出, 光-光效率 75.4%, 光束质量因子 $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$, 有效减小了激光器的体积和质量, 为高功率光纤激光器的热管理提供了新方法。

关键词: 光纤激光器; 相变直冷; 相变储能; 热管理

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210284

1.2 kW portable fiber laser

Zhang Liming, Zhang Kun, Zhao Hong, Sun Rufeng, Long Runze, Zhu Chen,
Song Kuiyan, Li Yao, Yu Yang, Zhou Shouhuan

(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, the 11th Research Institute of China
Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: High-power fiber lasers usually use water-cooled heat dissipation methods for temperature control, which are difficult to meet the needs of light. By using the characteristics of phase change energy storage materials and multi-phase change temperature control technology, the volume and weight of high-power fiber laser systems can be greatly reduced. In this paper, the temperature control technology of the fiber laser is analyzed, and the multi-phase change temperature control technology is used. The all-fiber laser output with a wavelength of 1.08 μm and a maximum power of 1.26 kW is achieved. The light-light efficiency is 75.4%, and the beam quality is $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$. The volume and weight of the laser is effectively reduced. It provides a new method for thermal management of high-power fiber lasers.

Key words: fiber laser, phase change refrigeration, phase change energy storage, thermal management

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑等特点^[1-2], 在军事、医疗、科研和工业等领域得到了广泛应用^[3-5]。

在高功率光纤激光器的军事应用中, 轻量化是其中的关键, 对于军用高功率光纤激光器, 随着输出功率水平的提高, 激光装备系统必然会更加复杂。同时激光器系统的电光转换效率不足 30%, 这意味着高功率激光器工作很短时间就会产生巨大的废热, 因此致使军用激光器装备冷却系统更加复杂。激光器输出功率越高, 激光器系统与冷却系统的体积与重量越大, 这是一个无法回避的矛盾。

通常, 散热手段包括水冷、风冷、传导冷却(包括传导到外壳及热管冷却等)等技术。其中, 风冷存在效率低、可靠性差等问题, 水冷散热是目前高功率光纤激光器的主要热管理手段, 但是水冷散热系统也存在一些缺陷, 例如功耗大、体积大以及重量大等等。而相变直冷与相变储能技术是一种非常高效的散热方式^[6-7], 相变直冷技术和相变储能技术主要是利用相变材料, 在相变点能够吸收或释放巨大的热量的同时保持等温或近似等温的优点, 实现对功率器件进行热管理的目的。最初相变储能技术多被用来对大太阳能、建筑领域和电子设备进行散热, 例如, 尹辉斌等人^[8]制备出一种石墨与石蜡相结合的复合相变材料, 快速热响应导热系数可达 4.67 W/(m·K), 将其在高热

* 收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2022-03-03
联系方式: 张利明, laser_2014@163.com。

负载环境应用进行实验,结果表明,在不同的热负载情况下该种材料散热系统的导热能力都有明显提高,约1.36~2.98倍。也有一些将相变材料应用到激光行业的研究,如伍志坚等人^[9]研制了相变制冷镜,通过在高功率氧碘化学激光器激光腔镜中填充相变材料来达到制冷的目的。中北大学的张琳^[10]研究采用相变储能与热电制冷相结合的方式针对泵浦源(LD)进行控温,证明了相变材料储能与热电制冷结合的可行性与实用性。程勇等人^[11]采用低熔点液态金属相变材料进行控温,研究了基于相变储能的二极管泵浦激光器温控技术,实验结果显示与风冷散热方式相比,该相变温控系统功耗减小到46%,体积减小到53%,表明相变温控技术可有效减小激光器的体积。刘倚红^[12]等人设计了一种半导体制冷复合相变硅镜,通过采用半导体制冷与相变储能相结合,在环境温度为20℃、加热量为100W时,这种新型制冷镜在制冷量为25W的情况下只需5s就可使镜体的微变形与温度恢复至开始状态。中国电子科技集团公司第十一研究所张利明研究团队^[13]采用相变直冷温控技术,对输出功率400W光纤激光器实现了有效温控,减小了激光器的体积和重量。

本文采用相变直冷和相变储能相结合的多相变温控方式、双端泵浦单谐振腔结构,实现了功率1.2kW的稳定激光输出,与同种功率水冷光纤激光器系统相比,本文采用相变直冷和相变储能相结合的多相变温控技术,大幅减小了全光纤激光器的体积与重量,为将来实现更高功率光纤激光器的轻量化奠定了基础。

1 实验布置

1.2kW便携式光纤激光器的实验原理如图1所示,本文采用6个976nm的锁波长半导体二极管(LD)作为泵浦源,最大输出功率300W,尾纤直径220/242 μm ,每只LD重量1kg。不同于单管式激光二极管,本文所用激光二极管采用巴条结构,体积小、功率大。其中,前向连接2只LD,后向连接4只LD。前后向泵浦耦合均采用(6+1) \times 1合束器,其中泵浦光输入端光纤尺寸为220/242 μm ,数值孔径 $NA=0.22$,主纤直径为220/242nm;谐振腔由增益光纤、全反光栅(HR FBG)和输出光栅(OC FBG)组成。采用直径为20/400 μm 、纤芯数值孔径 NA 为0.06的掺镱双包层光纤作为增益介质,该光纤对976nm泵浦光吸收系数为1.26dB/m,增益光纤(gain fiber)长度为18m;全反光栅对1080nm的激光反射带宽4nm、反射率99.6%,输出光栅对1080nm激光的激光反射带宽2.5nm、反射率为9.8%,采用包层光泄漏器滤除包层光,采用直径为20/400 μm 的QBH作为激光输出端。其中,激光器的光栅、增益光纤、LD和传能光纤易发热器件,均采用高导热率导热胶作为热传导介质,贴附在冷板上,冷板的热量通过外加强制温控导出。

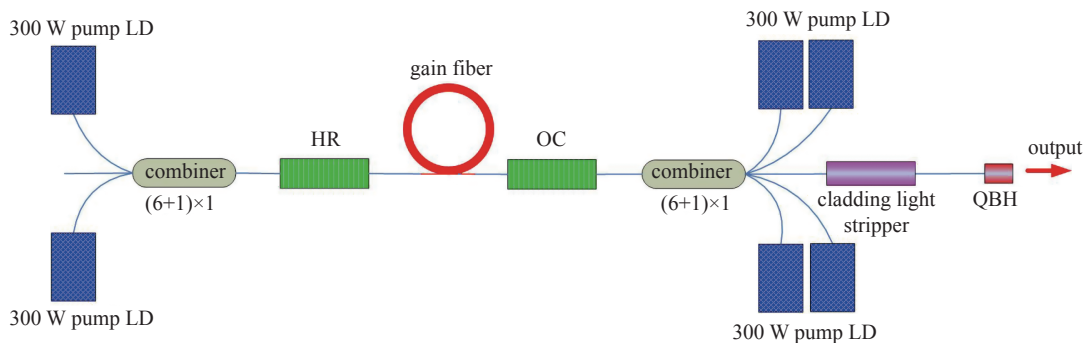


Fig. 1 Principle diagram of the 1.2 kW fiber laser

图1 1.2kW光纤激光器原理图

本文所设计光纤激光器拟输出功率1.2kW,为此设计制冷方案。1.2kW便携式光纤激光器的发热量比较大,根据电光转换效率35%计算,可估算出产热量约为2.2kW。因此要实现激光器的稳定工作,我们需要提供同等功率的制冷量以保证热平衡。在单独采用制冷技术控制激光器的工作温度时,所需电能消耗较高,导致供电系统电池或发电机的重量较重(一般需要30kg),因此从轻量化的角度考虑,单纯制冷不能满足条件。

综合考虑激光器的某些需求,其工作方式每次工作30s,间歇3min,然后再次工作,采用相变储能技术先将激光器单次工作产生的热量储存起来,再利用激光器相邻两次工作的间歇时间经过较低功耗的相变直冷将热量带走,采用此种方案将大大降低激光器的散热功耗,减轻供电电池(发电机)的重量,实现激光器系统的轻量化。

本文创新性地提出了采用相变直冷和相变储能相结合的方式对激光器控温,系统原理如图2所示,激光器冷板中装有石蜡等相变储能材料,相变直冷所用相变材料为氟利昂,制冷系统的制冷量为600W。控温过程为,激光器工作时产生的热量由储存在冷板中的相变储能材料吸收,相变储能材料发生固-液相变,将激光器产生的热量储

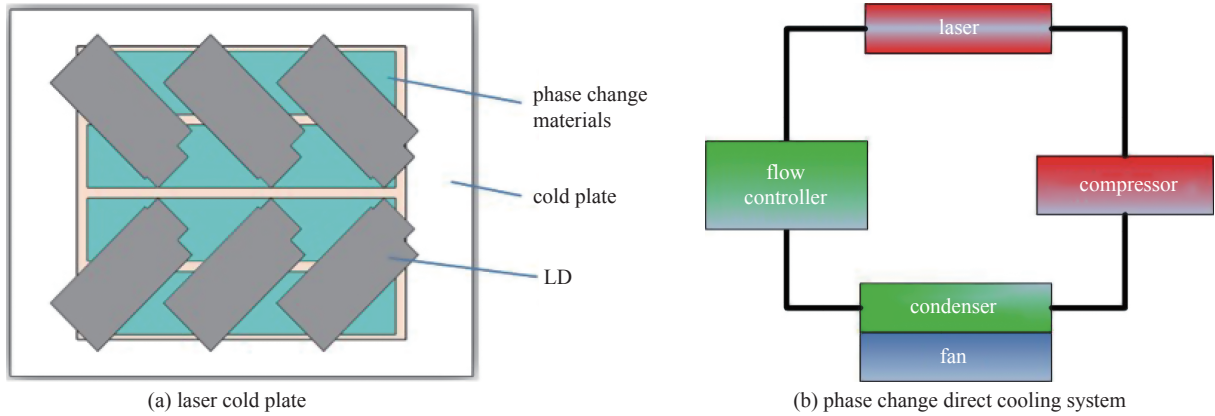


Fig. 2 Schematic diagram of laser temperature control

图 2 激光器控温原理图

存起来, 激光器冷板的温度保持不变, 激光器停止工作时, 制冷系统中的液态氟利昂流入冷板中, 储存并带走冷板中储存的热量, 具体表现为流量控制器控制液态氟利昂流入冷板的流量, 液态氟利昂在流入冷板的过程中, 由于流量控制器的开启, 液态氟利昂的压力突然变小, 氟利昂由液态迅速变为气态, 这一过程会吸收冷板的热量转换为氟利昂液-气相变的分子内能, 激光器产生的热量通过冷板传递给氟利昂并被氟利昂吸收, 由冷板流出的气态氟利昂流入压缩机, 压缩机对氟利昂气体加压, 在高压下气态氟利昂的凝结点为常温, 在通过冷凝器之后又凝结为液体, 如此循环实现对激光器系统的精确控温。与水冷系统相比, 本文采用了相变直冷控温技术, 将氟利昂直接通入激光器冷板进行散热, 氟利昂作为热交换介质, 代替了水冷系统中的热交换介质水, 减掉了水泵、水和水箱的重量, 水冷机的重量通常为 90 kg 及以上, 本文设计的相变直冷温控系统重量仅为 18 kg, 重量大幅减小。

2 实验结果与分析

采用量程 1.5 kW 功率计测量泵浦功率和激光功率, 当总泵浦功率 1.67 kW 时, 最大输出激光功率为 1.26 kW, 并且该相变直冷光纤激光器输出功率一直稳定在 1.26 kW, 光-光转换效率 75.4%, 激光器斜效率 78% (如图 3 所示)。实验所得光纤激光器的功率与理论计算结果相比较低, 分析原因, 增益光纤熔接过程中有所剪短、光学器件中光纤熔接处损耗、包层光剥离器等光学器件的插入损耗导致。

采用光谱分析仪(分辨率 0.02 nm)对 1.26 kW 的输出激光光谱进行了测量(如图 4 所示), 中心波长为 1 079.98 nm, 谱宽(FWHM)为 2.31 nm。

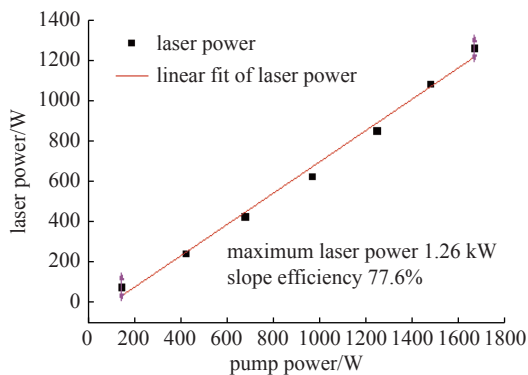


Fig. 3 Laser power varies with the power of the pump light

图 3 激光功率随泵浦光功率的变化

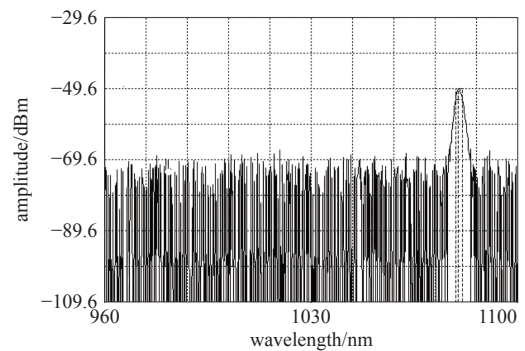


Fig. 4 Output laser spectrum

图 4 输出激光光谱

采用光束质量分析仪对输出功率为 1.26 kW 时的光束质量进行测量, 输出激光光斑图像及拟合曲线如图 5 所示, 得到光束质量因子 $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$ 。

为了研究相变温控方式对光纤激光器稳定性的影响, 对光纤激光器满功率输出条件下 LD、冷板以及增益光纤的温度变化情况进行了监测研究。在室温(20 ℃)条件下, 测量了功率输出 1.26 kW 时光纤激光器 LD、冷板和光纤的温度变化。如图 6 所示。光纤温度(fiber)增长比较缓慢, 表明增益光纤产热量能有效的被系统控制, LD 温度

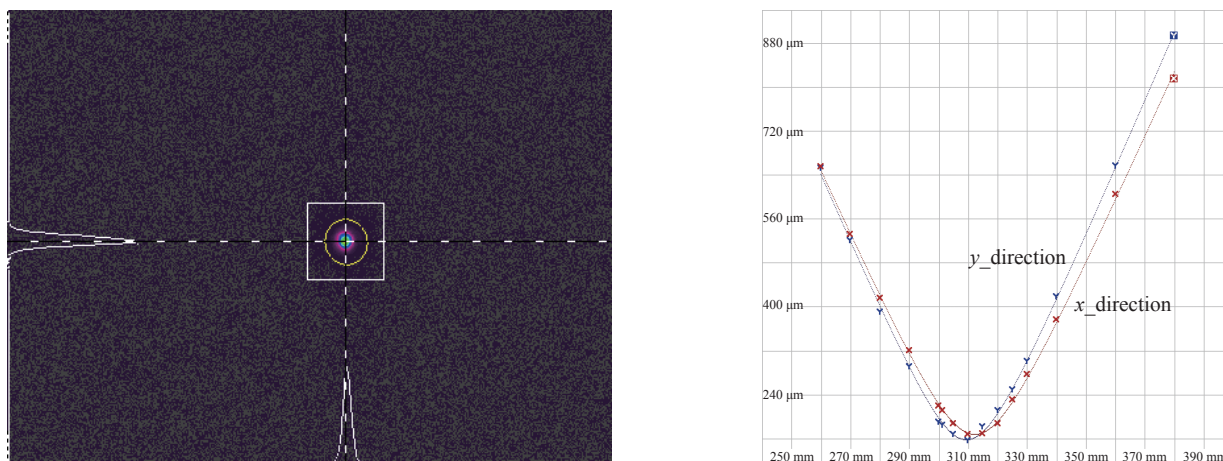


Fig. 5 Output laser spot image and fitting curves

图5 输出激光光斑图像及拟合曲线

随着工作时间的增长温度呈现加快上升趋势,说明相变储能材料已经全部融化(约 26 s),相变完成,因此 LD 产热开始积累,冷板温度因此也开始逐渐升高。

根据上图 6 光纤激光器各部分温度变化曲线可知,各部分温度变化随着激光工作时间的增加而升高。当光纤激光器满功率输出时(1.26 kW),随着工作时间增加 LD 温度迅速升高至 24 °C,光纤温度(fiber)增长至 21.5 °C,冷板温度(cold plate)变化不大。激光器在 30 s 的工作时间内,输出功率在 1.26 kW 附近仅有 2 W 的波动(如图 7 所示),激光器的输出功率稳定。分析认为,激光器采用了锁波长 LD 作为泵浦源,激光器工作过程中 LD 的温度变化小(3 °C),波长和输出功率不变,激光器的输出功率不变。由以上分析结果可知,LD、光纤的温度在可控范围内,能够保证光纤激光器稳定安全工作。

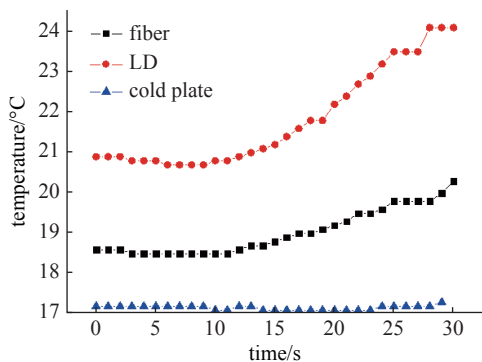


Fig. 6 Change of laser temperature with time when the power is 1.26 kW

图6 功率 1.26 kW 时激光器温度随时间的变化

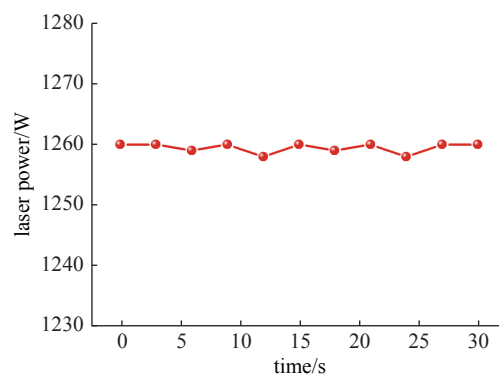


Fig. 7 Stability of output laser power

图7 输出功率稳定性

另外,本文在激光器的小型轻量化方面,创新性的提出了相变储能和相变直冷相结合的多相变温控技术,相比于采用大型水冷温控的 1.2 kW 级高功率激光器,本文提出的激光器技术更有利于单人携带。在体积重量方面将本论文的激光器与商用激光器做了对比。激光器系统均包含激光器及温控,商用 1.2 kW 级光纤激光器采用水冷方式进行控温,整个系统的体积 522 228 cm³、质量 157 kg,本文所研制激光器采用相变储能和相变直冷组合的温控方式,对激光器采取了光学、电学和温控一体化设计,体积仅 58 445.75 cm³、质量仅 50 kg,相比于商用光纤激光器,本论文研制的激光器质量减小了 68.2%,体积减小了 88.8%。

3 结论

本文分析了光纤激光器控温技术,提出了光纤激光器相变储能和相变直冷相结合的多相变控温技术,并实现了 1.26 W 的稳定激光输出,光-光效率 74.5%,光束质量 $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$,激光器温度得到了有效控制。成功实现了 1.26 W 连续光纤激光器小型化、轻量化,便于特殊条件下的单人携带。对比市场上同等功率水冷激光器产品,体积减小近 88.8%,质量减小 68.2%,实验结果表明,相变储能和相变直冷相结合的控温技术,实现了激光器工作 30 s、

间歇 3 min 的循环稳定工作,表明采用该系统制冷可实现激光器的长时间稳定工作。本文为将相变散热技术应用到光纤激光器提供了参考,也证实了相变散热技术对光纤激光器减小体积、质量具有很大的潜力。

参考文献:

- [1] 楼祺洪, 张海波, 袁志军. 光纤和光纤激光器[J]. 科学, 2018, 70(2): 32-37. (Lou Qihong, Zhang Haibo, Yuan Zhijun. Optical fibers and fiber lasers[J]. Science, 2018, 70(2): 32-37)
- [2] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [3] O'Connor M. High power fiber lasers for defense applications[C]//Proceedings of Fiber Laser Applications 2012. San Diego: Optical Society of America, 2012: FW3C. 1.
- [4] 吴彩缘. 高功率双包层光纤激光器及其应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2009. (Wu Caiyuan. High power double-clad fiber lasers and their applications[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009)
- [5] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135-138. (Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, et al. Recent progress of high-power fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138)
- [6] Tyagi V V, Buddhi D, Kothari R, et al. Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: an experimental study[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 51: 248-254.
- [7] Ge Haoshan, Li Haiyan, Mei Shengfu, et al. Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: an emerging frontier in energy area[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 331-346.
- [8] 尹辉斌, 高学农, 丁静, 等. 基于快速热响应相变材料的电子器件散热技术[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 52-56,104. (Yin Huibin, Gao Xuenong, Ding Jing, et al. Cooling technology of electronic device based on phase-change material with rapid thermal response[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(7): 52-56,104)
- [9] 伍志坚. 相变制冷在激光腔镜中的应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2003. (Wu Zhijian. Research of phase-change cooling applied on laser mirror[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2003)
- [10] 张琳. 高功率光纤激光器热控技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016. (Zhang Lin. Research on the thermal control technology for high power fiber laser[D]. Taiyuan: North University of China, 2016)
- [11] 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: 0102005. (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 Journal of Lasers*, 2016, 43: 0102005)
- [12] 刘倚红, 余文峰, 孙峰, 等. 半导体致冷复合相变硅镜光照热有限元模拟[J]. *激光技术*, 2005, 29(1): 10-11,18. (Liu Yihong, Yu Wenfeng, Sun Feng, et al. Finite element stimulating about laser radiation of semiconductor-cooled composite phase change silicon mirror[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 10-11,18)
- [13] 刘岩, 朱辰, 张利明, 等. 相变直冷高功率光纤激光器 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(12): 1425-1430. (Liu Yan, Zhu Chen, Zhang Liming, et al. Phase change direct cooling high power fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(12): 1425-1430)