

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

程 勇¹ 郭延龙¹ 何志祝² 谭朝勇¹ 刘 旭¹ 马云峰¹ 刘 静²

¹武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075

²中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190

摘要 二极管抽运固体激光器(DPSSL)热管理技术是决定其小型化、插头效率和光束质量等性能的关键因素之一。研究了基于低熔点液态金属镓合金相变材料的二极管抽运激光器(DPL)温控技术。对比实验研究结果表明,与体积更大的风冷肋片散热器相比,相变材料散热器能使激光器在高温 55 °C 环境中正常工作时间从 1 min 延长到 6 min、制冷功耗减小到 46%、散热分系统体积减小到 53%,并使激光器系统的插头效率由 3.02% 提高到 3.77%。理论计算和有限元仿真模拟再现了液态金属相变过程中温度变化规律,再次表明液态金属相变材料散热器具有功耗低和体积小等优势。为拓展液态金属相变材料在激光器热管理领域的应用奠定了理论和实验基础,具有重要的工程应用价值。

关键词 激光技术; 液态金属; 相变材料; 镓; 二极管抽运固体激光器; 热管理

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0102005

Application Research of Phase Change Material Heat Removal Technology for Compact High Efficiency Diode Pumped Laser

Cheng Yong¹ Guo Yanlong¹ He Zhizhu² Tan Chaoyong¹ Liu Xu¹ Ma Yunfeng¹ Liu Jing²

¹Opto-Electronics Facility, Wuhan Mechanical College, Wuhan, Hubei 430075, China

²Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Heat management has become one of the key techniques for diode pumped solid state laser's (DPSSL) performances, such as compact, plug-in efficiency and beam quality. The heat management technology for DPSSL based on low-melting-point Gallium alloys phase change material (PCM) is studied. Experimental result proves that, compared with air-cooled heat radiator, PCM heat radiator can extend laser working hours to six times longer, decrease cooling power to 46% and radiator's volume to 53%, and improve the plug efficiency from 3.02% to 3.77%. Furthermore, the finite element software ANSYS has been used to simulate the temperature distribution of PCM radiator. The simulated result indicates that PCM has advantages such as low cooling power and small volume. The results provide the theoretical and experimental basis in laser heat management using liquid metal, and has important engineering application value.

Key words laser technique; liquid metal; phase change material; Ga alloys; diode pumped solid state laser; cooling

OCIS codes 140.3320; 140.3580; 140.3480

1 引 言

随着激光技术的发展,激光器的功率体积比越来越大,对散热的要求也越来越高。散热问题已成为严重制约激光器系统实现小型轻量化、高效化的瓶颈之一。在某些激光器系统中,散热分系统的功耗已经接近甚至高于激光器本身的功耗,导致激光器插头效率难以提高以满足特殊工程需要。在各种激光器中,激

收稿日期: 2015-06-04; 收到修改稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国防预研项目(51302010104), 国家自然科学基金青年科学基金(61440011)

作者简介: 程 勇(1961—), 男, 教授, 主要从事固体激光器技术方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net

光二极管抽运激光器(DPL)对温度要求更为苛刻,其最佳性能的实现必须满足温度的波动性小于等于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至更高的要求,因此对散热系统的温控精度要求也相应提高。

现有散热手段包括风冷、水冷^[1]、传导冷却(包括传导到外壳及热管传导等)等技术^[2]。水冷是目前激光器热管理的主要技术之一,然而水冷系统存在可靠性差、功耗大及体积大等弊端,很难满足小型系统和特殊工程应用的需求。所以,对于中小型二极管抽运固体激光器,目前多采用半导体致冷片(TEC)和风冷肋片散热器耦合模式进行精确温控^[3-5]。

半导体致冷片的致冷效率会随其两端温差的增加而急剧下降。因此,为降低半导体致冷片热端肋片散热器的温度,肋片散热器及风扇一般需要较大体积,其体积和重量可占到激光器整体的六分之一到三分之一。如何缩减散热器的体积和重量,降低半导体致冷片功耗是散热和激光研究领域研究的热点和难点。对于短时间高功率工作的手持、车载用小型激光器,该问题尤为突出。

除了水冷等主动散热技术外,固液相变被动式散热是另一大类值得探索的热管理技术。众所周知,物质在固液相变过程中会吸收巨大的热量而其自身温度却保持不变。这一特殊属性可以用于能量存储,实现温度控制和热量管理。相变储热具有蓄能密度大、蓄放热过程近似等温、易于控制和可靠性高等优点。相变温控技术并不需要风扇,从而避免风扇具有的振动大、寿命短、噪音大、在缺乏空气的小型密闭系统中风冷效果差,在开放空间易导致肋片缝隙灰尘堵塞等缺点,因此固液相变散热储热技术受到研究者越来越多的关注,在航空相机、卫星、导弹电路以及机载行波管等方面逐渐被应用^[6-7]。

对于短时间大功率工作或间歇工作的激光器,完全可以利用材料的相变过程暂时储热,解决散热问题。采用熔点匹配的相变材料还可以有效降低半导体致冷片热端的温度,提高半导体致冷片致冷效率,减少半导体致冷片功耗。

同时,现有散热技术对配套设备的要求很高,例如间歇工作的激光器,休息时TEC和风扇要求的电流电压非常小,而工作时两者的电流电压却非常大,使得配套电源功率、体积难以减小。若采用相变材料散热储热技术,可以均衡工作时和休息时对散热负荷和电流的要求,减小工作时的电流,从而对配套电源的要求明显降低。

传统的相变材料主要有无机盐和石蜡两类。无机盐的缺点在于有明显的过冷现象,相变体积变化较大,化学稳定性欠佳,可靠性较差,有些无机盐有腐蚀性;石蜡的缺点在于热导率低,相变体积变化大。探索新型相变材料是目前国际研究的前沿方向。例如以石蜡为主体制备的新型复合材料,通过加入膨胀石墨、泡沫铝或肋片等来提高其热导率,但加入这些材料后,石蜡的相变潜热一般会有一定减小。

低熔点液态金属是一种崭新的相变材料,它是一种熔点接近室温的特殊金属及其合金^[8]。液态金属具有热导率高(例如镓的热导率为 $29.28\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,约为水的60倍),单位体积相变潜热大,相变时体积变化小,可靠性高等显著优势^[9]。因此,液态金属尤其适用于对控温精度要求高、热流密度高、体积受限、均温效果及对可靠性要求高的场合,是新一代高性能散热储热技术的研究热点^[9]。前期Ge等^[9]建立了基于低熔点镓基合金的智能手机热管理技术,具有较好的控温效果。然而,相变温控技术用于DPL激光器热管理方面至今未见报道。本文研究了基于低熔点合金相变材料的DPL温控技术,为发展新型相变温控技术奠定了基础。

2 实验研究

2.1 实验方法

本文采用的固体激光器参数如下:工作波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$;重复频率为 50 Hz ;输出能量为 80 mJ ;环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其工作为周期性模式:工作 1 min 并休息 1 min 为1个周期,要求能连续工作3个周期。激光二极管(LD)采用高温LD,其最佳工作温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作时需要 126 V 的电压 60 A 的电流的供电,抽运脉宽为 $240\text{ }\mu\text{s}$,产热率约为 55% 。

为了评估低熔点液态金属相变散热器的散热能力,还采用风冷肋片(材质全部为铝)散热器进行了对比实验。两种散热器实物照片见图1,左边为带相变散热器的激光器,总体积为 555 cm^3 ($179\text{ mm}\times 62\text{ mm}\times 50\text{ mm}$),右边为使用肋片风扇散热器的激光器,总体积为 721 cm^3 ($179\text{ mm}\times 62\text{ mm}\times 65\text{ mm}$)。风冷肋片铝散热器肋片厚度为 0.8 mm ,肋片间距为 1 mm ,其底板厚度为 5 mm 。肋片散热器体积为 $62\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 17\text{ mm}$,风扇体积

为 52.5 mm×52.5 mm×15 mm。液态金属相变材料散热器体积也为 62 mm×60 mm×17 mm。选择这一体积的原因,一是因为想与肋片散热器进行同样体积的对比,二是因为计算结果表明这一体积刚好满足工作时间要求。

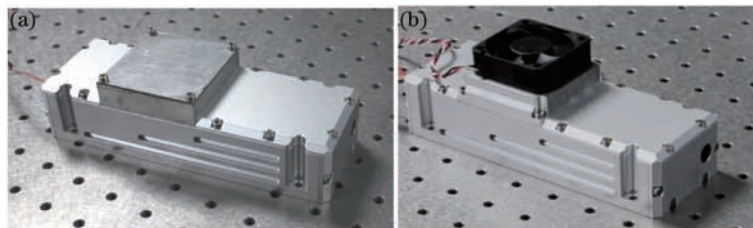


图1 两种散热器实物照片。(a)相变散热器;(b)风冷肋片散热器

Fig.1 Photos of two laser heat radiators. (a) Laser with phase change material heat radiator; (b) laser with air-cooled heat radiator

相变材料主要采用镓基合金,其热导率 $k=13 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ [明显高于水的热导率 $0.68 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,更高于石蜡的热导率 $0.3\sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,低于铝的热导率 $203 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$],因此如果在相变材料散热器壳体内部加几片辅助导热的肋片效果会更好,本实验中未加],密度为 $7.564 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。合金的等效热容 C_p 通过差示扫描量热仪测试获得,其温度依赖关系见图2。合金的相变过程融化开始于 58°C ,终于 70°C 。根据此图,合金相变时在 $55\sim 70^\circ\text{C}$ 区间吸收热量约为 $304 \text{ J}/\text{cm}^3$ 。融化开始温度为 58°C ,比最高环境温度 55°C 高 3°C ,可以确保合金不会提前发生融化。

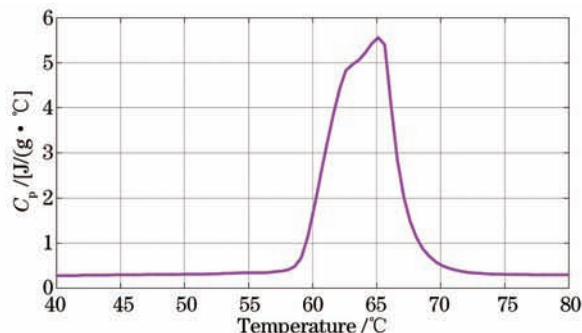


图2 相变材料等效热容图

Fig.2 Equivalent thermal capacity of PCM

用高低温箱,在最高环境温度为 55°C 下进行实验。用两个热敏电阻分别监控 LD 和散热器的温度,并记录其温度变化曲线。通过不断调节 TEC 致冷电流电压,使 LD 温度稳定在 $53\sim 62^\circ\text{C}$ (目前实验采用手动调节,因此温度波动较大,以后将使用自动温控电源)。规定 LD 温度明显超出正常工作范围(大于或者等于 62°C) 时,激光器能量将低于指标要求,不能正常工作。LD 刚好超过 62°C 之前的时间,定义为激光器正常工作时间。每隔 30 s 记录一次散热器和 LD 的温度以及 TEC 电流和电压。

2.2 实验参数设计

根据 LD 工作特性,选择最佳的散热器参数对于优化散热性能至关重要。因此,下面将先讨论 2.1 节中实验设置的理论依据。LD 发热功率可以由下式估算:

$$Q_{LD} = U \times I \times \tau \times f \times \eta, \quad (1)$$

式中 U, I, τ, f, η 分别表示 LD 的输入电压为 126 V、电流为 60 A、脉宽为 240 μs 、重复频率为 50 Hz、发热效率为 55%。计算得到 LD 发热功率为 49.9 W,即为 TEC 制冷功率(制冷负荷)。

假定液态金属相变散热器正常工作期间相变刚好完成,由 55°C 逐渐升温到 70°C 。相变散热器在 70°C 时,考虑到 LD 温度必须是 55°C ,则 TEC 冷热端温差为 15°C ,根据 TEC 工作特性曲线,估计 TEC 制冷效率 (f_{COP}, COP) 约为 1.5,制冷效率定义如下:

$$f_{COP} = \frac{Q_c}{P_{in}}, \quad (2)$$

式中 Q_c 是制冷功率, P_{in} 是 TEC 的输入电功率。

计算得 TEC 耗电功率为 33.3W(此处可见,高功率体积比 DPL 激光器中,TEC 功耗是影响激光器插头效率的最重要因素之一),这是激光器正常工作时间结束时 TEC 的最大耗电功率。工作过程中,TEC 电功率会随两端温差加大不断加大,保守估计,TEC 平均电功率取最大耗电功率的三分之二,估计平均电功率为 22.2 W。因此,TEC 热端总产热量为

$$Q = (Q_{LD} + P_{in}) \times t, \quad (3)$$

式中 t 为总有效工作时间。考虑三个循环(激光器休息的 3 min 内 TEC 耗电功率很小,此处忽略),产热量为 12978 J。

相变材料散热器向外界对流散热的功率由下式得到

$$Q_t = h_t \cdot \Delta T \cdot S, \quad (4)$$

式中 h_t 为对流散热系数,静态空气中取 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, ΔT 为散热器与外界环境的温差,工作期间平均温差取最大温差的一半为 7 C , S 为散热器散热面积。散热器底面大小为 $62 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,计算可知,散热器高度在百毫米量级以下时,对流散热功率相比产热功率非常小。简单计算时,对流散热对相变储热的影响可以忽略不计。

基于上述分析,首先讨论相变散热器设计依据。相变材料所需高度应该为

$$h = \frac{V}{S} = \frac{Q}{L \cdot ab}, \quad (5)$$

式中 V 是相变材料所需体积, S 是相变材料散热器底面有效面积, Q 是三个循环内的总热量,即散热器需吸收的热量, L 是单位体积相变材料的相变潜热为 $304 \text{ J}/\text{cm}^3$, a, b 分别为散热器底面有效长度和宽度,其值分别为 5.8 cm 和 5.6 cm 。计算得 h 为 1.31 cm 。考虑到液态金属容器壳体上下各有 2 mm 的壁厚,因此相变材料散热器总高度设计为 17 mm 。由下式可计算激光器插头效率:

$$\gamma = \frac{Ef}{U \times I \times \tau \times f + P_{in}}, \quad (6)$$

式中 E 为激光脉冲能量,设计为 80 mJ ,计算得插头效率 γ 为 3.54% 。

如果激光器需要工作更长时间,简单地增加液态金属容积就可以了。由于液态金属的热导率远高于石蜡等常用相变材料,相变通常会按时完成,因此,设计时不用像石蜡一样留很多余量或加很多肋片。例如,如果需要激光器工作 6 个循环,则 6 个循环产热量共计: $72.1 \text{ W} \times 60\text{s} \times 6 = 25956 \text{ J}$ 。相变材料体积应该为: $25956 \text{ J} \div 304 \text{ J}/\text{cm}^3 = 85.38 \text{ cm}^3$,相变材料所需高度为 2.63 cm 。考虑到液态金属容器壳体上下各 2 mm 的壁厚,因此相变材料散热器总高度设计为 30 mm 。这个总高度仍然小于风冷肋片散热器 32 mm 的总高度(肋片散热器 17 mm ,加上风扇 15 mm)。

对于风冷肋片散热器,同样假设温度升到 70 C ,与环境温差 15 C ,风冷对流散热系数按 $20 \text{ W}/(\text{C} \cdot \text{m}^2)$ 估算。则该风冷肋片散热器散热功率(能力)为 $0.0389 \text{ m}^2 \times 15 \text{ C} \times 20 \text{ W}/\text{C} \cdot \text{m}^2 = 11.67 \text{ W}$,远小于总产热功率 99.8 W 。因此预计肋片散热器将继续升温至高于 80 C ,TEC 耗电量将大于 62.4 W ,这样肋片散热器需要散掉的热量更多,温度继续升高。预计激光器系统插头效率远低于 $50 \text{ mJ} \times 80 \text{ Hz} / (90.7 \text{ W} + 62.4 \text{ W} + 2.8 \text{ W}) = 2.57\%$,其中 2.8 W 为风扇功耗。

如果要风冷完全满足总产热功率为 99.8 W ,同样假设散热器温度升到 70 C ,散热面积必须至少达到: $99.8 \text{ W} / [(70 \text{ C} - 55 \text{ C}) \times 20 \text{ W}/\text{C} \cdot \text{m}^2] = 0.3327 \text{ m}^2$,这个散热面积显然过大。

风冷散热器更适合在高温差(相对于环境)下工作,因此,需要以牺牲插头效率和 TEC 功率为代价,减小风冷散热器体积。重新假设温度升到 80 C ,则根据 TEC 工作特性曲线,估计 TEC 制冷效率约为 0.8 ,即 TEC 需耗电: $49.9 \text{ W} / 0.8 = 62.4 \text{ W}$,则总产热功率变为: $(49.9 + 62.4) \text{ W} = 112.3 \text{ W}$,此时散热面积必须至少达到: $112.3 \text{ W} / [(80 \text{ C} - 55 \text{ C}) \times 20 \text{ W}/\text{C} \cdot \text{m}^2] = 0.2246 \text{ m}^2$ 。

对于这个散热面积,按肋片厚度为 0.8 mm ,肋片间距为 1 mm ,底板厚度为 5 mm ,长度为 62 mm ,宽度为 60 mm 不变计算,肋片高度必须达到 69 mm ,散热器体积将高达 $62 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 74 \text{ mm}$ 。这个体积将导致激光器体积和功率体积比指标严重超标。

基于上述的讨论,可见液态金属相变材料散热器理论上具有蓄能密度较大、体积小、不需要输入功率(风扇)、可靠性高(没有风扇带来的故障可能)等优势。

2.3 实验结果分析

为了验证其控温效果,做了对比实验研究。图3记录了分别使用两种散热器时,激光器内部LD和散热器底部各自的温度变化曲线。从图3可以看出,相变散热器,可以正常工作3个循环,激光器正常工作时间大于6 min。6 min后,相变结束,相变散热器温度不断升高,不能稳定控温了;而风冷肋片散热器在第1 min温度即超过了62℃,不能对LD稳定控温,激光器正常工作时间小于1 min。如果想让具有风冷散热器的激光器正常工作3个循环,必须极大地加大散热面积。

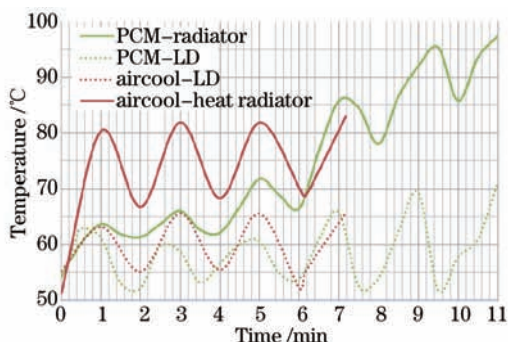


图3 55℃时,两种激光器的LD及散热器温度变化曲线

Fig.3 Temperatures curves of two LDs and heat radiators at 55 °C

从图3可以看出,前6 min,相变材料散热器的温度都明显低于风冷肋片散热器,对于温差越小制冷效率越高的TEC来说,理论上可以节省很多致冷功率。实验中TEC输入电流电压不断波动,采用相变材料散热器时,TEC平均功率约为23.7 W;而采用风冷肋片散热器时,TEC平均功率约为49.2 W。LD输入功率为126 V×60 A×240 μs×50 Hz=90.7 W,实测激光单脉冲能量平均输出为86.1 mJ,风扇功耗2.8 W。根据上述参数,可以计算出使用液态金属相变散热器时,激光器插头效率为3.77%,而使用风冷肋片散热器时,激光器插头效率为3.02%。且液态金属相变散热器体积明显小于肋片风扇散热器(省了风扇的体积)。

3 仿真及分析

为更加精确进行散热设计和分析,使用ANSYS进行模拟。首先建立模型,使用Solidworks按上述实验装置尺寸(62 mm×60 mm×17 mm)分别建立相变材料散热器的容器、盖板和内部相变材料的模型(液态金属没有完全装满,上面留有0.5 mm空隙)。材料参数如表1所示。

表1 材料参数表

Table 1 Parameters of materials

	Thermal capacity /[J/(kg·°C)]	Density /(kg/m ³)	Thermal conductivity /[W/(m·°C)]
Al	900	2700	203
PCM	see Fig.1	7564	13

根据测得的液态金属的热容参数,由(7)式计算得到焓与温度关系,导入ANSYS。

$$H = \int \rho C(T) dT, \quad (7)$$

式中H为焓值,ρ为密度,C(T)为随温度变化的比热容。将其他材料参数导入ANSYS,划分网格。底面施加一个热流密度为:72.1 W/6cm/6.2 cm=19381 W/m²的热源,根据要求,施加1 min,停1 min,模拟4个工作循环,计算得出温度。分别计算出铝壳体底面尖角处(安装热敏电阻测温处)和液态金属上表面中心(温度最低点)的温度变化曲线,见图4。

从图4中可以看出明显的4个循环过程。每个工作循环,加热(工作)阶段温度上升,不加热阶段由于热量向内部传递温度下降。第四个循环升温速度大大高于前三个循环,表明在前三个循环相变材料变为液态吸热发挥了作用,大致在第三个循环某时刻相变材料全部变为液态。理论模拟温度略高于实测温度,变化趋势相同。原因应该在于实验中,为了避免使LD高度过高影响抽运,没有在液态金属散热器与激光器壳体之间加隔热板,导致散热器上部分热量传导到壳体中去。

图5记录了相变材料上表面中心点温度变化规律。可以发现,相变材料上表面中心点温度没有下降阶段,一直缓慢上升。在300 s时(第三个循环加热阶段结束时),该点温度为67.5℃,小于70℃,说明还没有完全相变完成。在310 s时,该点温度突破70℃,全部相变材料完成相变。

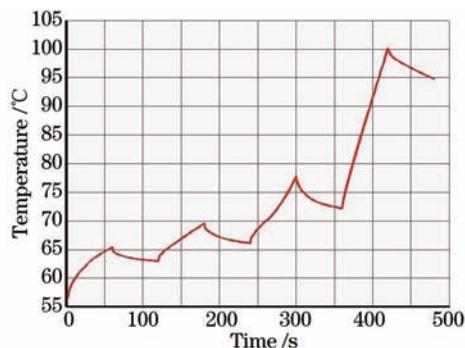


图4 相变材料散热器底面尖角处温度变化图

Fig.4 Temperature of PCM heat radiator's corner

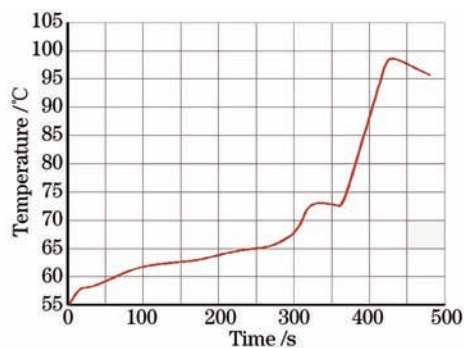


图5 相变材料上表面中心温度变化图

Fig.5 Temperature of center of PCM's upper surface

图6展示了300 s时散热器中心截面上的温度场。可见散热器底端由于更靠近热源,其温度要明显高于顶端区域。整个传热过程耦合了相变吸热和热传导。液态金属相变材料由于热导率较高(相比石蜡等非金属材料),温度梯度较小,能够快速及时地完成相变吸热任务。

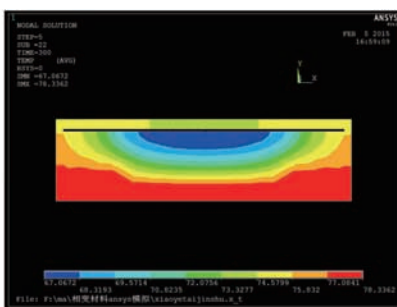


图6 300 s时散热器温度分布截面图

Fig.6 Temperature distribution of heat radiator's section at 300 s

4 结 论

通过对比实验和有限元仿真方法,研究了将液态金属相变材料应用于某激光器散热系统。通过相变吸热,对于短时间间歇工作的DPL激光器,成功实现了小型化,提高了激光器效率。对比实验研究结果表明,与风冷肋片散热器相比,相变材料散热器能使激光器在高温55℃环境中正常工作时间从1 min延长到6 min、制冷功耗减小到46%、散热分系统体积减小到53%以及使激光器系统的插头效率由3.02%提高到3.77%。这些研究为拓展液态金属相变材料在激光器热管理领域的应用奠定了理论和实验基础,同时也表明液态金属相变材料散热储热技术具有较为广阔的推广应用前景和较大的经济效益。

参 考 文 献

- 1 Liu Gang, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, *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.
- 2 Xu Pengxiang, Li Xuechun, Wang Jiangfeng, *et al.*. Gas-cooling laser diode-pumped solid-state laser amplification module design and thermal management[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002001.
徐鹏翔,李学春,王江峰,等. 气体冷却激光二极管抽运的固体激光放大模块设计及热管理研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002001.
- 3 Zhang Hongwu, Zhang Liang, Li Kun, *et al.*. Temperature control system of high power semiconductor laser[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2005, 43(5): 642-644.
张洪武,张 亮,李 坤,等. 大功率半导体激光器恒温系统[J]. 吉林大学学报(理学版), 2005, 43(5): 642-644.

- 4 Liu Haiqiang, Guo Zhen, Wang Shiyu, *et al.*. Research on the thermal contact conductance using multi-piece heat sink to hold crystal and dissipate heat in solid state laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502006.
刘海强, 过 振, 王石语, 等. 固体激光器中多块热沉夹持晶体散热时接触热导研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502006.
- 5 Gao Guangbo, Zheng Simu. Application of semiconductor refrigeration to laser cooling system[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(2): 46-49.
高光波, 郑四木. 热电制冷在激光器冷却系统中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(2): 46-49.
- 6 Li Yanwei, Yang Hongbo, Zhang Hongwen, *et al.*. Application of phase change thermal control in CCD assembly of altitude optical sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3016-3020.
李延伟, 杨洪波, 张洪文, 等. 相变热控在高空光学遥感器 CCD 组件中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3016-3020.
- 7 Jin Huacun. A study on forced air cooling and thermal control through phase-change of fusible material[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2005, 21(6): 25-28.
金华群. 强迫空气加相变散热研究[J]. 电子机械工程, 2005, 21(6): 25-28.
- 8 Haoshan Ge, Haiyan Li, Shengfu Mei, *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.
- 9 Haoshan Ge, Jing Liu. Keeping smart phones cool with gallium phase change material[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2013, 135: 054503.

栏目编辑: 宋梅梅