

两相冲击强化换热激光二极管用单片热沉

王爱国¹ 袁俊飞¹ 武德勇² 高松信² 唐大伟¹ 曹宏章^{1*}

(¹中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190
²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 针对大功率激光二极管(LD)的冷却需求,基于沸腾-空化耦合效应,以及场协同理论,研制了一种微通道两相冲击强化相变热沉,封装腔长 1.5 mm 的 LD 线阵。实验测试了连续功率 LD 输出 0~100 W 时的电-光转换效率以及电流-输出功率等特性,冷却工质采用 R134a,磁驱齿轮泵电机转速 23 Hz 时热沉热阻为 0.211 °C/W。结果显示微通道相变热沉具有良好的取热能力,能够满足大功率 LD 的散热要求。与改进前的热沉相比,基于场协同理论优化了的两相冲击热沉,热阻明显下降。

关键词 激光器;激光二极管;沸腾-空化耦合效应;两相冲击;场协同理论;微通道相变热沉

中图分类号 TK124 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1002003

Micro-Channel Heat Sink with Two Phase Impinging Jets for Laser Diode Bar

Wang Aiguo¹ Yuan Junfei¹ Wu Deyong² Gao Songxin² Tang Dawei¹ Cao Hongzhang¹

(¹Institute of Engineering Thermo Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
²Institute of Applied Electronics, China Academy Engineering of Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A micro-channel phase-change heat sink has been developed for cooling high power continual laser diode (LD) based on coupling of boiling-cavitation in micro-channel and field synergy principle. The electron-optic conversion efficiency, output wavelength and the relation between input current and output power are measured experimentally when LD output power changes from 0 to 100 W. The cooling refrigerant is R134a. The thermal resistance of heat sink is measured as 0.211 °C/W when the magnetic drive gear pump is operated at 23 r/s motor speed. Comparing with the previous heat sink, the thermal resistance of the micro-channel phase-change heat sink based on field synergy principle decreases significantly.

Key words lasers; laser diode; coupling of boiling-cavitation; two phase impinging jets; field synergy principle; micro-channel phase-change heat sink

OCIS codes 000.6850; 140.2020; 350.7420

1 引言

激光二极管抽运固体激光器(DPL)已成为当今光电子科学的核心技术,作为 DPL 抽运源的激光二极管(LD)正常工作时的热耗占总功耗的 50% 以上,是 DPL 系统中最主要的产热元件,若不能进行有效散热,热积累将导致 LD 结温升高,对其输出参数有显著影响。目前最为广泛用于冷却 LD 的是微通道液冷热沉^[1~3],随着 LD 输出功率的不断增大,

其散热量越来越高,提高冷却热沉的取热能力已经成为 DPL 研究中的技术难点^[4~7]。研究表明,微通道内稳定相变取热量大,成为解决上述问题的重要方法。作者所属课题组基于沸腾-空化耦合效应已研制出微通道相变热沉,热阻为 0.31 °C/W^[8]。本文基于场协同理论,在前期工作基础上研制了一种新型微通道相变热沉,冷却工质采用 R134a,通过测量 LD 输出特性,测试了热沉的取热性能,热沉热阻

收稿日期: 2011-05-03; 收到修改稿日期: 2011-07-04

作者简介: 王爱国(1982—),男,博士研究生,主要从事微尺度传热传质方面的研究。E-mail: wangaiquo@iet.cn

导师简介: 唐大伟(1964—),男,博士,研究员,主要从事传热传质及热物理测试等方面的研究。E-mail: dwtang@iet.cn

* 通信联系人。E-mail: caohongzhang@iet.cn

达到了 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

2 微通道内的沸腾-空化耦合效应与场协同理论

由于具有极高的换热系数,近年来微通道内的沸腾换热成为国际传热界的研究热点之一。然而微通道内流动沸腾过程中极易出现振荡现象,导致局部蒸干^[9~11],研究表明在微通道内设置水力空化结构,可以促进液-气相变的发生,并且有效抑制振荡

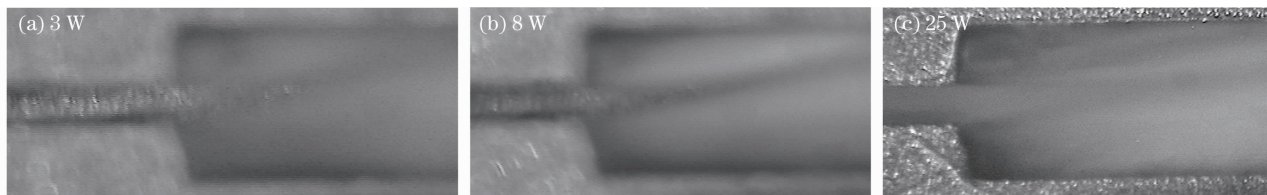


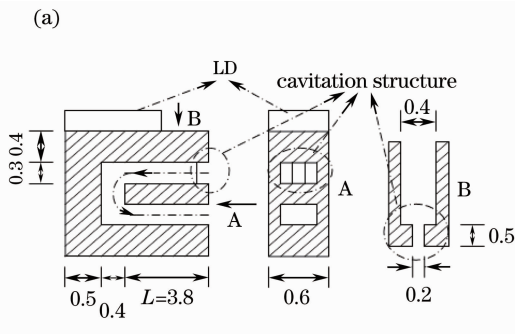
图 1 沸腾-空化耦合效应下微通道内流型

Fig. 1 Flow patterns in micro-channel with boiling-cavitation coupling effect

作者所属课题组此前研制了带有空化结构的微通道相变热沉,测试表明,热沉的热阻为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,具有良好的取热能力,能够满足大功率 LD 散热量大于等于 100 W 的需求^[8]。本文基于场协同理论对此前的热沉进行了改进。

李志信等^[16]在场协同理论原理中指出,流动当量热源不仅取决于速度场和热流场本身,还取决于速度与温度梯度之间的夹角场,即不仅取决于速度场、热流场、夹角场的绝对值,还取决于此 3 个标量值的相互搭配。对流传热中速度场与热流场的配合能使无因次流动当量热源强度提高,从而强化传热,此时称之为速度场与热流场协同较好^[12]。速度矢量与温度梯度矢量的夹角余弦值尽可能大,即两矢量的夹角 β 尽可能地小 ($\beta < 90^{\circ}$) 或 β 尽可能地大 ($\beta > 90^{\circ}$) 是速度场与温度梯度场协同的重要体现之一。

本文本着速度场与温度梯度场尽量协调的原则来设计热沉的结构。



3 热沉结构设计

基于沸腾-空化耦合效应以及场协同理论,设计了新型的微通道线阵 LD 热沉。

热沉材料采用无氧铜,多层叠焊,封装 LD 线阵长度 10 mm ,腔长 1.5 mm 。热沉内冷却通道采用激光加工为矩形,单通道实验结果表明水力直径小的通道相变换热系数较高^[17],同时依据加工条件,确定通道宽 0.4 mm ,深 0.3 mm ,间距 0.2 mm ,通道长度设为 0.3 mm 。热沉内取热部分设计结构如图 2(b)所示,单相液体通过热沉入流通道后首先经过水力空化结构[图 2(b)中所示通道截面突扩处],然后进入冷却通道相变吸热,最后经出流通道流出热沉。与图 2(a)所示前期设计的热沉比较^[8],本文热沉在图 2(b)中局部放大处,形成了两相流体对热源的冲刷,速度矢量与温度梯度矢量夹角接近于 0° ,协同较好。

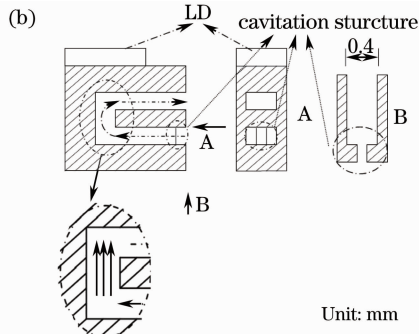


图 2 热沉结构示意图。(a)前期设计的热沉;(b)本文的热沉结构

Fig. 2 Heatsink structure. (a) Previous heat sink structure; (b) heat sink structure in this paper

4 热沉性能测试系统与测试结果

图 3 为热沉性能测试装置示意图,冷却工质为制冷剂 R134a。工质由磁力齿轮泵 1 驱动,流经流量计 2 测量流量后进入入口模块 3,然后流入热沉 5,在热沉内部发生沸腾-空化耦合相变取热后,流入口模块 4,然后流入冷凝器 6,冷却后的工质流入磁力泵,完成一个循环。

实验装置中制冷循环由变频压缩机 7 及压缩机冷凝器 8 构成,在膨胀阀 9 处膨胀蒸发,用来冷却实验系统中的工作介质。

入口模块内置的热电偶和压力传感器分别测量入口的温度和压力,出口模块内置的热电偶和压力传感器分别测量出口的温度和压力,由功率计 10 测量 LD 输出光功率,同时测量输入电压、电流以及输出波长,其中输入电功率=输入电压×输入电流,bar 条发热功率=输入电功率-LD 输出光功率。

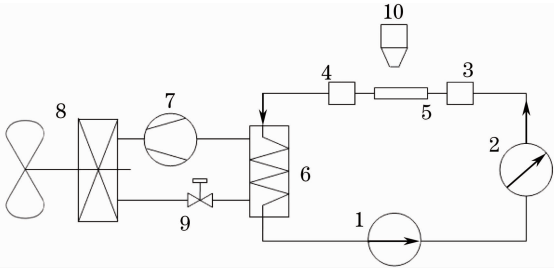


图 3 热沉性能测试装置示意图

Fig. 3 Schematic of test setup

图 4~8 依次为驱动电机频率不同时 LD 输入电流与电压、LD 输出功率与输入功率、热沉流量与 LD 输入功率、LD 输出波长与输入功率的变化关系以及热沉压降变化,图 9 为齿轮泵电机频率为 17 Hz 时热沉进出口温度变化,图 10 为齿轮泵电机频率为 19 Hz,LD 输出波长为 808.11 nm 时的波形图。

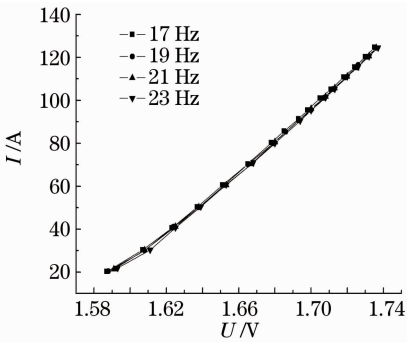


图 4 LD 输入电流与电压的关系

Fig. 4 Input current versus input voltage

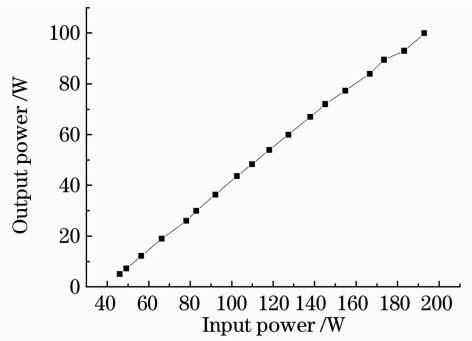


图 5 LD 输出功率与输入功率的关系

Fig. 5 Output power versus input power

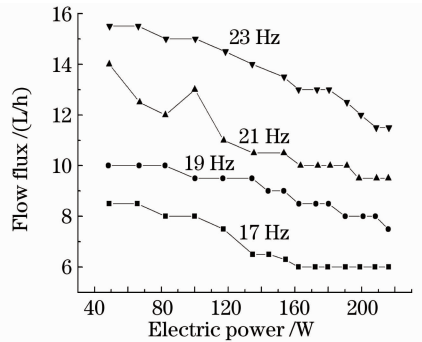


图 6 热沉流量与输入功率的关系

Fig. 6 Flow flux versus input power

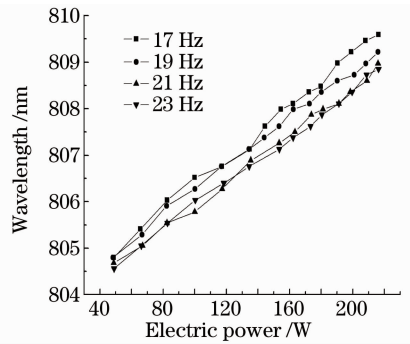


图 7 LD 输出波长与输入功率的关系

Fig. 7 Wavelength versus input power

从图中可以看出,电机频率不同时 LD 输入电流与电压关系保持良好线性,输出能量分布良好,说明 LD 工作状态正常,热沉取热均匀;热沉进出口温度较为稳定,热沉工作正常;电机频率上升时(流量上升),高功率下 LD 输出波长较短,说明热沉取热性能随流量上升增强,即热沉热阻下降。相变热沉的压降特性与 LD 发热功率相关,发热功率增大则压降增大,循环系统需要与发热功率和热功率增长速度相匹配。

图 11(a)~(d)分别为测试过程中对应不同电机频率时的热沉热阻。

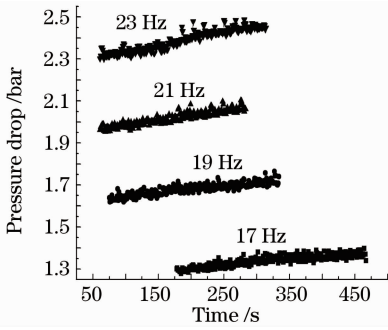


图 8 热沉压降变化

Fig. 8 Pressure drop of heat sink

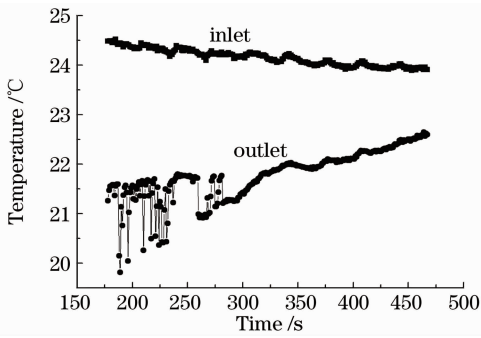


图 9 齿轮泵电机频率为 17 Hz 时热沉进出口温度变化

Fig. 9 Input temperature while the motor frequency is 17 Hz

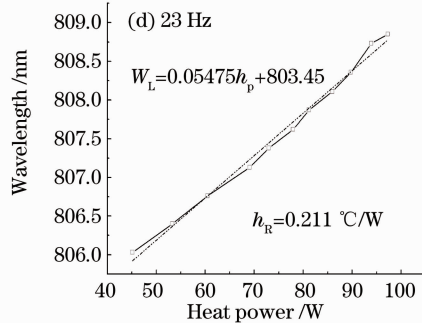
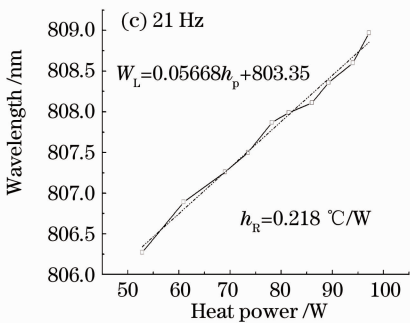
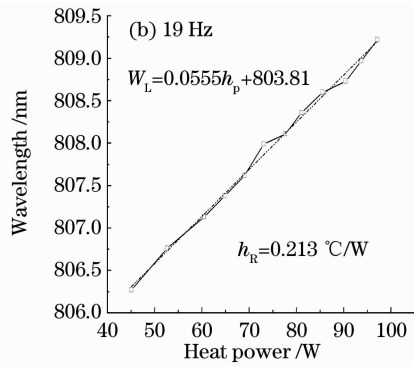
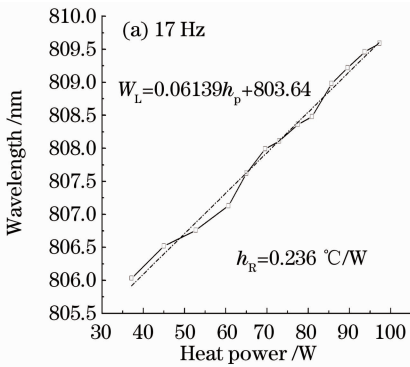


图 11 不同电机频率时的热沉热阻

Fig. 11 Heat sink thermal resistance at different motor frequencies

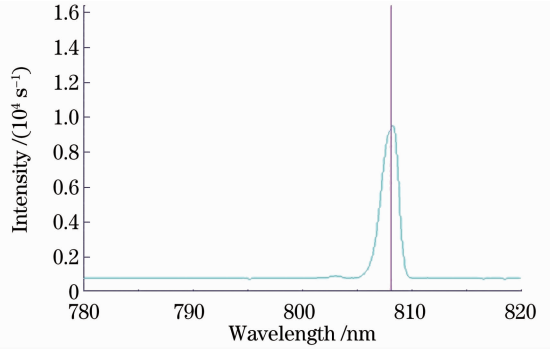


图 10 齿轮泵电机频率为 19 Hz, LD 输出波长为 808.11 nm 时的波形图

Fig. 10 Oscillogram while wavelength is 808.11 nm and the motor frequency is 19 Hz

热阻通过以下方法确定:首先得到 LD 输出波长-发热功率关系,线性拟合后斜率与 LD 温度系数比值即为热沉热阻;不同电机频率时的热沉热阻 h_R 分别为 $0.236\text{ }^\circ\text{C/W}$ (17 Hz), $0.213\text{ }^\circ\text{C/W}$ (19 Hz)、 $0.218\text{ }^\circ\text{C/W}$ (21 Hz), $0.211\text{ }^\circ\text{C/W}$ (23 Hz)。作者在前期的工作中得到改进前的热沉热阻为 $0.31\text{ }^\circ\text{C/W}$ ^[8],两者相比较,改进后的热沉热阻分别减小 23.9%,31.3%,29.7%,31.9%,取热能力明显增强。

5 结 论

基于沸腾-空化耦合效应及场协同理论,研制了

一种微通道相变热沉。实验测试结果表明热沉内工质很快达到稳定相变工况,并且在 bar 条输出功率

增加过程中热沉内工质一直保持为两相,没有发生蒸干现象,表明所研制的热沉具有良好的冷却性能,完全满足 bar 条散热量大于等于 100 W 的要求,能够保证大功率 LD 稳定安全地工作。流量上升时,高功率下 LD 输出波长较短,说明热沉取热性能随流量上升增强,即热沉热阻下降。与改进前的热沉相比,基于场协同理论优化了的两相冲击热沉,热阻明显下降。

参 考 文 献

- 1 Lü Wenqiang, Tu Bo, Wei Bin *et al.*. Micro-channel heatsink module for high power diode laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0): 83~86
吕文强,涂波,魏彬等.高功率二极管激光器模块式微通道冷却器研制[J].*强激光与粒子束*, 2005, **17**(S0): 83~86
- 2 Li Qifeng, Lü Wenqiang, Wu Deyong *et al.*. Fabrication of V-shaped silicon microchannel cooler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0): 114~116
李奇峰,吕文强,武德勇等.V形槽硅微通道冷却器研制[J].*强激光与粒子束*, 2005, **17**(S0): 114~116
- 3 Tang Chun, Wu Deyong, Gao Songxin *et al.*. Package technique for CW 40 W 808 nm quantum-well linear array diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 513~516
唐淳,武德勇,高松信等.连续40 W 808 nm量子阱线阵二极管激光封装技术[J].*中国激光*, 2002, **A29**(6): 513~516
- 4 Liu Dong, Liu Minghou, Wang Yaqing *et al.*. Experimental studies on large height/width ratio and mini-channel radiator for high power density laser cooling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 640~645
刘东,刘明侯,王亚青等.大高宽比小槽道冷却大功率激光器的实验研究[J].*中国激光*, 2010, **37**(3): 640~645
- 5 Wang Yaqing, Liu Minghou, Liu Dong *et al.*. Experiment study on non-boiling heat transfer performance in spray cooling for high-power Laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1973~1978
王亚青,刘明侯,刘东等.大功率激光器喷雾冷却中无沸腾区换热性能实验研究[J].*中国激光*, 2009, **36**(8): 1973~1978
- 6 Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. 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
- 7 Si Chunqiang, Shao Shuangquan, Tian Changqing. Experimental study on integrated refrigeration-spray cooling system for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0102008
司春强,邵双全,田长青.高功率固体激光器用一体化制冷喷雾冷却系统实验研究[J].*中国激光*, 2011, **38**(1): 0102008
 - 8 Cao Hongzhang, Tang Dawei, Xu Hongbo *et al.*. Micro-channel heat sink based on boiling-cavitation coupling effect for LD bar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1): 83~86
曹宏章,唐大伟,徐洪波等.基于沸腾-空化耦合效应的微通道线阵LD用热沉[J].*强激光与粒子束*, 2011, **23**(1): 83~86
 - 9 H. Y. Wu, P. Cheng. Boiling instability in parallel silicon microchannels at different heat flux[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**(17-18): 3631~3641
 - 10 A. E. Bergles, S. G. Kandlikar. On the nature of critical heat flux in microchannels [J]. *Heat Transfer*, 2005, **127**(SL): 101~107
 - 11 R. Revellin, P. Haberschill, J. Bonjour. Conditions of liquid film dryout during saturated flow boiling in microchannels [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**(24): 5795~5801
 - 12 B. Schneider, A. Koşar, Y. Peles. Hydrodynamic cavitation and boiling in refrigerant (R-123) flow inside microchannels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(13-14): 2838~2854
 - 13 A. Koşar, C.-J. Kuo, Y. Peles. Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(23-24): 4867~4886
 - 14 Y. Peles, A. Koşar, C. Mishra *et al.*. Forced convective heat transfer across a pin fin micro heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(17): 3615~3627
 - 15 A. Koşar, Y. Peles. Convective flow of refrigerant (R-123) across a bank of micro pin fins [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, **49**(17-18): 3142~3155
 - 16 Li Zhixin, Guo Zengyuan. Field Synergy Principle of Convective Heat Optimization [M]. Beijing: Science Press, 2010. 62
李志信,过增元.对流换热优化的场协同理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 62
 - 17 Cao Hongzhang, Xu Hongbo, Liang Nian *et al.*. Experiment investigation of R134a flow boiling process in micro-channel with cavitation structure [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2011, **32**(7-8): 542~553