

半导体激光抽运源大通道水冷热沉的接口设计

尧舜 丁鹏 张亮 张辉 曹银花 王智勇

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

摘要 针对普通大功率半导体激光抽运源用大通道水冷热沉热阻高、工作时热沉表面在大通道水流方向存在明显温升进而导致加载其上的激光 bar 寿命不一致以及抽运源整体光谱宽度难以控制的问题, 利用商用有限元软件 ANSYS 仿真获得抽运源工作时不同冷却水流量条件下热沉内部温度场分布, 分析该结构热沉热阻系统的构成及整体热阻瓶颈所在。实际中通过改变冷却水接口结构, 获得“入口效应”, 提高了大通道热沉整体换热性能, 进一步减小热沉表面温度梯度。利用所设计的新接口大通道水冷热沉获得 3 bar 线阵 120 W 连续(CW)输出半导体激光器抽运源, 输出中心波长为 807.7 nm, 光谱宽度(FWHM)为 2.8 nm。

关键词 激光技术; 半导体激光器; 水冷热沉; 接口设计; 抽运源

中图分类号 TN365 文献标识码 A

Normal Water Cooled Heatsink's Inlet Design of Semiconductor Laser Pumping Source

Yao Shun Ding Peng Zhang Liang Zhang Hui Cao Yinhua Wang Zhiyong

(National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Facing the problems of high thermal resistance and high temperature difference on the top surface of semiconductor laser arrays' directional macro-channel liquid-cooled heat sinks inducing different lifetimes and hard controlling of spectral width, the temperature distribution of internal heat sinks through the finite element modeling is presented. The heat sink under consideration is made of copper with varying the area of coolant inlet. Established analysis and simulation models show that a heat sink with smaller inlet area provides a lower surface temperature gradient and a better capability of heat dissipate. A continuous wave (CW) 120 W output semiconductor laser arrays pump source (3 laser bars) is obtained by using this kind of small inlet macro-channel heat sink. The central wavelength is 807.7 nm with a full wavelength at half maximum (FWHM) of 2.8 nm.

Key words laser technique; semiconductor laser; water cooled heatsink; inlet design; pump source

1 引 言

随着半导体激光器的输出功率不断增大^[1,2], 其散热部分负担越来越重, 特别是在作为固体激光器抽运源方面的应用, 半导体激光器的热管理水平直接影响半导体激光抽运固体激光器(DPSSL)的整体性能^[3,4]。近几年来, 微通道热沉凭借其低热阻、集成度高的优点逐步在高功率半导体激光器的散热方面占据主导地位, 然而该结构热沉所存在的固有缺陷却一直没能克服: 1) 昂贵的价格和热沉中去离子水的使用限制了其在军事、工业等领域的广泛应用; 2) 微通道内部的高侵蚀限制了其寿命远

低于新一代激光 bar 的极限寿命^[5~7], 成为寿命瓶颈。鉴于这一现状, 目前大多中等功率需求的侧面抽运棒状激光晶体半导体激光抽运固体激光器系统中仍多采用水流通直径为毫米量级, 水流通方向与激光晶体棒平行的铜质大通道热沉^[8,9]。这种结构大通道热沉具有加工简单、寿命长、不需去离子水, 对冷却水管路要求低等优点, 但其热阻较大, 当热负载比较高时, 在其水流方向热沉表面有明显的温度梯度, 导致抽运源光谱展宽整体抽运效率下降。

目前, 以该结构热沉为基础的半导体激光抽运固体激光器系统报道很多, 但多以分析整体光学结

构为主体,详细介绍抽运源热管理方面的文章较少。本文以一个连续输出 120 W 的抽运源为例通过对大通道水冷热沉内部传热机制的分析,利用商用有限元软件 ANSYS 模拟其流场、温度场的分布,提出一种新的冷却水接口结构提高了大通道水冷热沉的整体换热性能,减小了热沉表面温度梯度并利用该结构热沉实际作出了激光器抽运源。

2 传热机制分析

图 1 是大通道热沉抽运源的结构示意图。工作时,激光条(bar)所产生的废热经过两侧的支架(Submount)传递到热沉中然后通过通道内的冷却水带走。实际抽运源制作过程中通常先把单个激光 bar、支架以及绝缘层预先焊接成一体形成亚封装模

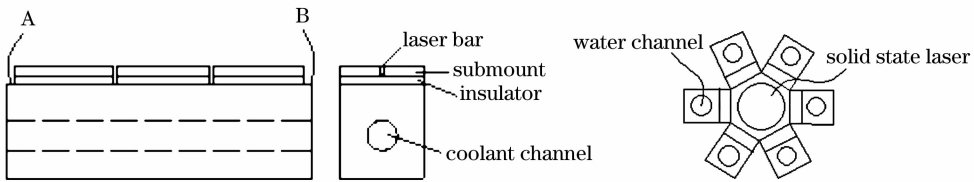


图 1 大通道热沉抽运源的结构示意图

Fig. 1 Structure of normal water cooled heatsink pumping source

普通大通道热沉两端冷却水接口直径、通道直径以及管路水管直径基本相同,当冷却水通过管路进入热沉内部通道时,流体场形态为完全发展段湍流形式。此时,由于流体的粘性,水流中靠近管壁的水力边界层已经完全形成而热边界层才刚刚开始形成,在这种情况下其壁面的对流换热系数不能用常用工程强制对流散热实验关联式如:Sieder-Tate 方程、入口段修正等进行计算^[10]。而在亚封装模块的实际安装工作过程中必须根据其表面温度值及其纵向分布选取相应波长的激光 bar 合理排列,才能得到符合要求的光谱分布。

3 有限元仿真

为了得到大通道热沉在抽运源工作时的温度分布,采用商用有限元软件进行仿真计算。在仿真计算中,因为整体器件温度并不高且冷却水流速比较快,冷却水在热沉内部温升不大。在忽略空气的自然对流散热和热辐射散热的同时假设水保持常物性(20 °C物性),热沉内管道表面水力光滑,把 3 个连续输出 40 W 激光 bar 的发热量(按光电转换效率 45% 计算发热量)换算为热流密度($6.53 \times 10^5 \text{ W/m}^2$)均匀加载到大通道热沉的表面。冷却水速度分布按光滑管中湍流时均速度指数分布规

律,即

$$v/v_{\max} = (y/R)^{1/n},$$

v 为局部速度, v_{\max} 为管内中心线的速度, R 为管道半径,而 y 是该处离管壁的距离, n 值取 7,水流入口温度设置为 20 °C。热沉为 6.5 mm × 10 mm × 33 mm 的无氧铜立方体,内部水流通道半径为 2 mm。有限元分析划分网格主要集中在水流通道壁面附近,整体划分单元数为 3.4×10^4 个,当网格单元数增加到 1×10^5 个时结果差别小于 2%,因此可视为计算结果与网格划分无关。

图 2 为计算得到普通大通道热沉在不同冷却水

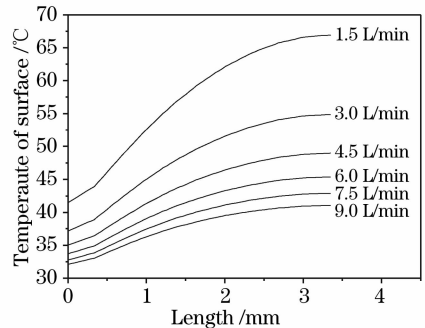


图 2 不同冷却水流量下普通大通道热沉表面温度分布

Fig. 2 Temperature profile of normal macrochannel heatsink at different coolant flux

流量条件下热沉顶部表面温度沿冷却水流方向分布。由图 2 可以看到,随着冷却水流量的提高,热沉表面温度迅速下降,当流量大于 6 L/min 后,进一步提高冷却水流量,对于降低热沉表面温度效果并不明显,这说明此时系统的散热瓶颈并不在冷却水的流量,简单依靠提高冷却水流量并不能对散热性能有太大的改善。同时考虑到实际工作中,多个抽运源同时工作,单个热沉中冷却水流量太大会增加水抽运负担,因此在本系统中 6 L/min 的流量是一个比较合理的优化值。此时,热沉表面沿水流方向温差大于 12 °C,该方向上线性排列 3 个亚封装模块,则其底部平均温度分别为 41.39 °C,47.56 °C,50.66 °C,为了确保抽运源整体输出光谱线宽在 3 nm 左右必须根据激光 bar 的温漂系数对激光 bar 进行选择,才能保证激光 bar 输出中心波长一致。以入水口端亚封装模块中激光 bar 中心波长为基准,水流方向上激光 bar 的中心波长应分别减小 1.8 nm 和 2.8 nm 左右。而由于同一批激光 bar 中心波长基本一致,要获得合格的抽运源必须从不同批次制作的激光 bar 中进行严格挑选,这无疑对器件的一致性不利,同时增加了工序和难度。另一方面,使用时还必须规定冷却水流方向,否则导致光谱进一步展宽。

图 3 为计算得到当冷却水流量为 6 L/min 时普通大通道热沉截面内部温度分布,由该图可以看出冷却水流经热沉内部时,只有管壁附近水温明显升高带走热量,而大部分冷却水温度基本不变,整个过程热交换程度较低。这是由于冷却水在进入热沉内部以前经过很长的管内流动,管壁附近形成了稳定的粘性流体层流底层,热量必须以热传导的形式通过该层进入主流区被带走,使得整体热阻较大。

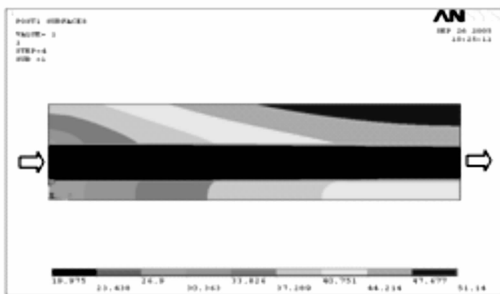


图 3 普通大接口大通道热沉内部截面温度分布

Fig. 3 Internal temperature profile of normal inlet heatsink

针对这一问题,在实际热沉结构设计中采用减小进水口截面积的方法来改善热沉整体性能,同时为了提高热沉的对称性,在水流出口处采用了相同的结构。这种处理主要是为了破坏冷却水在管路中

已经形成的层流底层,使其在进入热沉内部后重新形成,利用“入口段效应”来提高热沉的换热能力。图 4 为计算得到采用新接口方式的大通道热沉工作时截面内部温度分布。热沉其他结构与普通大接口设计大通道热沉完全一致,只是把进出水口截面半径减小为 1 mm。由图 4 可以看出,冷却水进入热沉内部后形成喷口型,水力边界层和热边界层重新开始形成,换热系数较大,导致靠近上管壁附近水流温度迅速升高,提高了整体器件的散热能力。

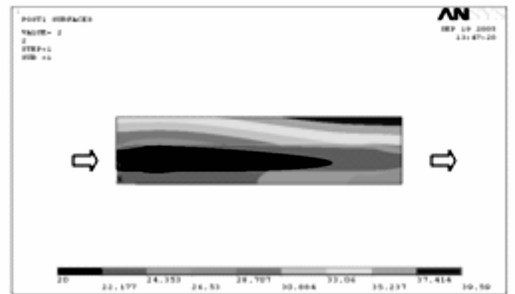


图 4 新接口大通道热沉内部截面温度分布

Fig. 4 Internal temperature profile of small inlet heatsink

图 5 为 ANSYS 计算得到普通大通道热沉与新接口大通道热沉表面纵向温度分布比较。由图 5 可以看出,新接口大通道热沉表面温度梯度较小且平均温度明显低于普通接口大通道热沉,这符合传热学中的“入口段效应”。由图 5 可得,热沉两端表面温差为 5 °C 左右,同样以入水口端激光 bar 中心波长为基准,水流方向上激光 bar 的中心波长应分别减小 0.54 nm 和 1.14 nm 即可保证 3 个激光 bar 输出中心波长一致。此范围内的波长差异可以非常容易地在同一批激光 bar 中挑选到与之相接近的器件,同时在光谱线宽要求不是非常严格的情况下,采用该结构热沉甚至可以不考虑激光 bar 波长的差异而进行挑选,冷却水流方向对其影响也不大。

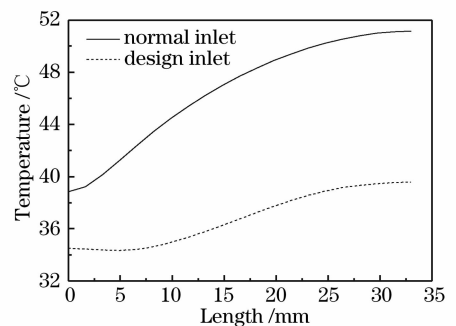


图 5 普通大通道热沉与新接口大通道热沉纵向表面温度分布比较

Fig. 5 Surface temperature profile in the water flow direction of normal inlet heatsink and small inlet heatsink

4 实验结果

将三个连续输出 40 W 亚封装模块用 In 合金焊料焊接在新接口大通道热沉表面,通过冷却水循环系统对热沉提供冷却水,水流量为 6 L/min,冷却水温设置为 20 °C。抽运源工作时利用热耦测得热沉顶部表面 A,B 两点(如图 1 所示)的温度;由于冷却水循环系统温控不是很精确因此实际测试中冷却水温在 18.1~21.6 °C 之间振荡。图 6 为实验中测得 A,B 两点的温度与 ANSYS 计算结果的比较,两者符合得比较好。图 7 为抽运源工作时的 $P-I$, $U-I$ 特性曲线以及光谱分布,当抽运源输出功率为 120 W 时,光谱中心波长 807.7 nm,谱宽(FWHM) 2.8 nm 满足抽运光所需指标。

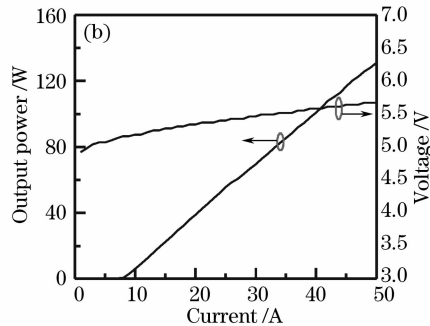
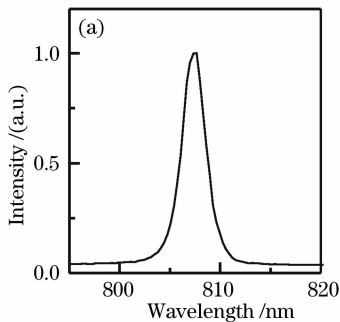


图 7 所得抽运源整体输出参量

Fig. 7 $P-I$, $U-I$ curves and spectrum of the pumping source

5 结 论

利用有限元软件 ANSYS 对传统大通道热沉工作时内部温度场分布进行仿真计算,并进一步通过改变接口结构减小了热沉表面温度梯度,提高了热沉整体散热能力。在实际中利用这种热沉组装出 120 W 连续输出抽运源,中心波长 807.7 nm,光谱宽度 2.8 nm。

参 考 文 献

- H. X. Li, I. Chyr, X. Jin *et al.*. >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(1): 27~29
- D. Schröder, J. Meusel, P. Hennig *et al.*. Increased power of broad area lasers (808 nm/980 nm) and applicability to 10 mm-bars with up to 1000 Watt QCW [C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560N
- Norbert Lichtenstein, Berthold Schmidt, Arnaud Fily *et al.*. DPSSL and FL pumps based on 980 nm-telecom pump laser technology: changing the industry [C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 77~83

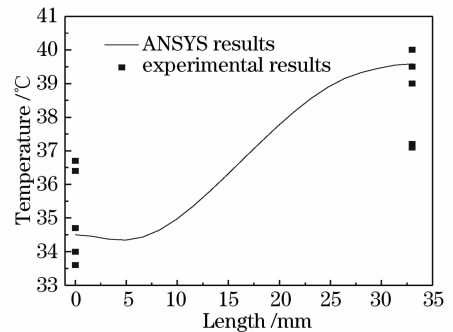


图 6 新接口大通道热沉表面温度分布计算结果与实验结果比较

Fig. 6 Calculated and experimental results of surface temperature profile

- Du Xiangwan. Some comments on high average power DPL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(suppl.): 1~3
- 杜祥琬. 对高平均功率 DPL 的几点认识[J]. *强激光与离子束*, 2005, **17**(增刊): 1~3
- D. Wolff, G. Bonati, P. Hennig *et al.*. Reliability of high power diode laser bars in industrial applications[C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 66~72
- Norbert Lichtenstein, Yvonne Manz, Pascal Mauron *et al.*. 325 Watt from 1-cm wide 9xx laser bars for DPSSL- and FL-applications[C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 1~11
- D. Lorenzen, M. Schröder, J. Meusel *et al.*. Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars[C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 610404
- Ed Stephens John Goings. Microchannel cooling ups power capacity for laser-diode bars[J]. *Laser Focus World*, 2006, **5**: S7~S9
- Hu Chunhua, Bi Yong, Sun Zhipei *et al.*. Laser-diode pumped 500 W continuous-wave Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 13~15
- 胡春华, 毕勇, 孙志培等. 连续波 500 W 全固态 Nd:YAG 激光器研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 13~15
- Donald Pitts. Leighton Sissom Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer[M]. Second edition, McGraw-Hill Companies, Inc., 1998