

激光与光电子学进展

多单管激光器微通道内部翅片结构设计及优化

赵瑞, 石琳琳*, 王越, 李岩, 邹永刚, 马晓辉

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为了实现高功率半导体激光器连续泵浦源输出,设计一种使用微通道热沉封装多个单管半导体激光器的堆叠结构。基于有限元分析,此结构可以通过辅助热沉和微通道内部圆柱翅片扩展单管半导体激光器的传热渠道,与传统凹槽微通道相比,热传导效果有所增强,优化提出斜翅片结构,控制水流速,调节流体流动从而产生混流效应,进一步改善微通道散热性能,对其封装下的多单管进行功率拟合,理论最大输出功率可达 128.75 W,在微通道热沉所需制冷功耗较低的前提下,可以实现多单管半导体激光器连续工作模式下泵浦且满足其散热需求。

关键词 半导体激光器; 微通道; 斜翅片; 有限元分析; 散热性能

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222711

Design and Optimization of Internal Fin Structure of Multi-Tube Laser Microchannel

Zhao Rui, Shi Linlin*, Wang Yue, Li Yan, Zou Yonggang, Ma Xiaohui

National Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract To realize the continuous pumping source output of high-power semiconductor lasers, we design a stacked structure of multi-tube semiconductor lasers based on a microchannel heat sink packaging. Based on the simulation using finite element analysis software, this structure can expand the heat transfer channel of a single-tube semiconductor laser by assisting heat sink and cylindrical fins inside the microchannel. Additionally, the heat conduction effect is enhanced compared with the traditional groove microchannel. Furthermore, the oblique fin structure is optimized to control the water flow rate and promote the mixed flow effect, further improving the heat dissipation performance of the microchannel and power fitting on multiple single tubes under its packaging. The theoretical maximum output power can reach 128.75 W, which can realize the pumping of multi-tube semiconductor lasers in continuous working mode and meet their heat dissipation needs under the premise of low cooling power consumption required for microchannel heat sinking.

Key words semiconductor laser; microchannel; oblique fin; finite element analysis; thermal performance

1 引言

随着高功率半导体激光器泵浦源应用需求的提高,将多个半导体激光器单元器件进行堆叠封装,其具有可实现体积小兼具高功率密度的优点,在提供高功率密度激光泵浦源模块上具有较大的应用潜力^[1-3]。将半导体激光器多个发光点水平集成在一列形成半导体激光器阵列,与单管相比,其具有成倍增加的输出功率,通常可以实现数十个巴条堆叠的百瓦级甚至千瓦级功率输出^[4-5]。然而,密集的发光单元叠装

难免会产生过多的热量使激光器性能降低甚至失效,要想在有限空间内提高功率的同时及时消除功率并耗散所转化的废热,对激光器封装的热管理水平提出了极高要求。微通道热沉因其体积紧凑、质量轻和传热性能高效等优势广泛应用于多巴条堆叠封装的散热模块,是主流的优化紧密封装型半导体激光器的封装方式^[6]。然而随着巴条堆叠层数的增加,多数微通道热沉制冷功耗仅能满足多巴条激光器在脉冲模式下工作,无法满足连续泵浦工作的散热要求,而且由于每个发光点间隔较小,激光器受热串扰限制导致光束弯曲

收稿日期: 2022-10-09; 修回日期: 2022-11-23; 录用日期: 2022-11-30; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61804013,61804014)、长春理工大学青年基金(XQNJJ-2017-2)

通信作者: *shilinlin@cust.edu.cn

形变影响光束整形精度,严重降低激光功率密度^[7]。对多单管堆叠封装而言,单管具有高亮度、低废热且易于维修等优势,并且凭借微通道热沉优异的传热性能可以在较低驱动水泵的功耗下,实现多单管半导体激光器连续泵浦的工作模式,既可以弥补功率上的不足,又可使合束后的激光功率密度更加集中。因此,通过微通道热沉进行堆叠封装的多单管半导体激光器在提供连续高功率密度泵浦方面具有更大优势,所以研究如何将微通道热沉高效应用于封装多单管半导体激光器散热,具有重要意义。

为了提高微通道传热性能,研究者们已经对微通道热沉内部流道的结构尺寸,流道内部介质的传热特性及微通道材料的选择进行了大量优化^[8-10]。随着工业技术不断发展进步,微通道热沉内部结构逐渐精细复杂化,研究者们发现合理控制凹槽纵横截面比可以改善流体换热系数,提高微通道散热能力^[11]。Derakhshanpour 等^[12]研究了在微通道内部设置有微圆柱阵列的流体流道,对层流模型下的流体换热系数进行三维模拟,发现微圆柱阵列的加入会导致流体之间发生冷热混流,从而打破流固接触面处原有的稳态热边界层,形成一个新的、较薄的热边界层,显著改善微通道散热性能。Lee 等^[13]进一步探究微通道内部设置有斜截面翅片的流体流动性能,控制斜角角度和斜面间距等变量进行实验分析,发现具有一定倾斜角度的翅片可以更好地调节流体流动,从而打破更多的稳态热边界层。与微型圆柱阵列相比,斜截面翅片具有更低的泵功消耗和更好的换热性能。因此,微通道热沉的内部结构设计优劣是影响多单管半导体激光器散热好坏的关键,通过设计微通道内部的流体传热结构可以优化多个管芯的热量传导,改善热积累效应,这也是本研究设计的重点。

本文提出一种基于微通道热沉的多单管半导体激

光器堆叠封装结构,首先通过辅助热沉将每个单管激光器进行竖直排列封装,从而利用辅助热沉将单管 N 面和 P 面废热纵向传导进入微通道热沉,同时在微通道热沉内部设置微翅片结构,可以在拓展热量传导途径的同时增加流体流线的扰动性,使得冷却液混合流动,增强流体的换热能力。这种内部引入翅片的微通道热沉应用在多单管堆叠封装结构,在微通道热沉所需制冷功耗较低的前提下,可以实现多单管半导体激光器连续工作模式下泵浦且满足其散热需求。

2 模型设计

多单管堆叠封装模型结构,是由辅助热沉、过渡热沉、微通道热沉组成的高密度封装结构,如图 1 所示。通过辅助热沉竖直封装 6 个输出功率为 10 W 的单管半导体激光器,波长为 976 nm,材料为 GaAs。考虑减少热串扰对单管激光器带来的热应力影响,辅助热沉材料选择膨胀系数与 GaAs 相近的钨铜,钨铜价格低廉、生产方便、导电性良好^[14],可以实现多个管芯间的串联结构。过渡热沉材料选用新型热门材料金刚石,其耐高温、抗腐蚀、绝缘性良好,热导率可达 1800 °C/W,可以增加辅助热沉向微通道传热的接触面积^[15]。微通道材料选用传统无氧铜,价格低廉、制作工艺较为成熟,材料参数如表 1 所示。

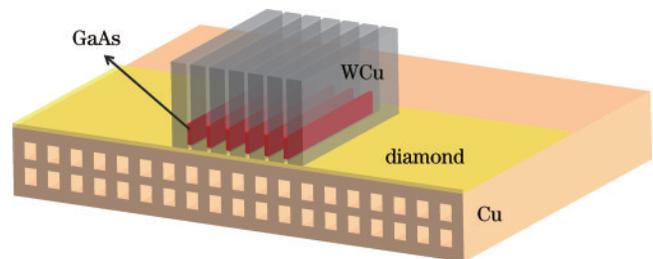


图 1 封装模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of package model structure

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Structure	Material	Size / (mm × mm × mm)	Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
Heat source	GaAs	4 × 0.5 × 0.1	57
Submount	WCu	4.5 × 2 × 0.4	170
Submount	Diamond	11.7 × 5.5 × 0.3	1800
Microchannel	Cu	11.7 × 8.8 × 1.6	398

两种微通道热沉结构如图 2 所示。为避免混淆,首先命名两种微通道:凹槽微通道和圆柱微通道。凹槽微通道即为内部不设置有微翅片的传统凹槽流道,通过凹槽流道壁面的光滑性让流体不受阻碍形成稳定平流,增加流体的平稳性。圆柱微通道是在内部一定区域设置有圆柱翅片的微通道,流体流经圆柱翅片时,可以通过翅片间隙扰动流体流线形成混流,提高流体的换热系数。凹槽微通道如图 2(a)所示,首先一层无

氧铜刻蚀有 19 个凹槽,然后凹槽纵横尺寸为 0.4 mm × 0.3 mm,并且每个凹槽间隔为 0.3 mm。圆柱微通道如图 2(b)所示,在钨铜焊接处下方的 5.5 mm × 4.5 mm 微通道区域刻蚀直径为 0.4 mm 的 7 × 9 阵列圆柱翅片,并且圆柱翅片间距为 0.5 mm,最后将相应上下两层对称刻蚀好的无氧铜与中间铜隔板通过热扩散进行焊接,分别生成凹槽微通道和圆柱微通道。

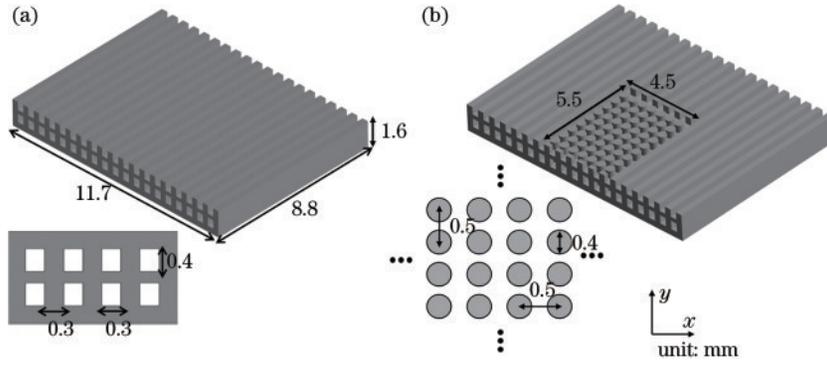


图 2 微通道热沉结构示意图。(a)凹槽微通道;(b)圆柱微通道

Fig. 2 Schematic diagram of the microchannel heat sink structures. (a) Grooved microchannels; (b) cylindrical microchannels

3 控制方程和边界条件

为了简化模型问题,提出以下假设:1) 流体流动为稳态层流;2) 流体为不可压缩流动;3) 流体动力黏度和热导率为温度的函数,固体的物理性质恒定。基于上述假设,控制方程为连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

动能方程:

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla \cdot \mathbf{V}) = -\nabla P_s + \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{V}, \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho C_p(\mathbf{V} \cdot \nabla T) = K_f \nabla^2 T, \quad (3)$$

$$K_s \nabla^2 T = 0, \quad (4)$$

式中: ∇ 为哈密顿算符; \mathbf{V} 为速度矢量; ρ 为流体密度; μ 为流体动力黏度; P_s 为压强; C_p 为流体恒压比热容; T 为温度; K_f 、 K_s 为流体和固体的导热率。

边界条件如下:入水口设为速度入口,速度为 1.5 m/s,流体为冷却水,水温设为 25 °C,出水口设置压力出口,外部环境为正常大气压。流体与固体之间接触面设置膨胀层,层数为 5,其他接触面均设置为绝热面,热源施加在芯片处,热功率密度为 $5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ 。

4 实验仿真

4.1 网格独立相关性

模拟采用基于有限元分析法的 Ansys Fluent 流固耦合分析软件进行仿真,其中网格独立相关验证是必需的。网格划分太少,计算结果不能收敛;网格划分太多,加大计算机计算进程,也会造成结果不收敛;因此,验证合理的网格数才能有效地保证仿真合理准确。以凹槽微通道模型进行网格独立性验证,网格独立验证如表 2 所示。表 2 给出了粗网格 60 万到细网格 220 万之间的激光器最高温度,可以看出粗网格和细网格的温度差异小于 0.5%。因此网格尺寸可以选择介于二者之间的中网格进行数值模拟。

4.2 热模拟分析

为分析两种微通道热沉结构的热传导效果差异,

表 2 网格独立验证

Table 2 Grid independent verification

Meshing accuracy	Number of node	Maximum temperature of the chip /°C
Coarse	597329	63.05
Medium	1344678	63.23
Fine	2227463	63.87

模拟了连续热源工作模式下热沉表面的热量分布。两种微通道热沉在温度等值线的温度云图如图 3 所示。由图 3 可知,同时处于 50 °C 时,凹槽微通道热沉上表面的单管传热区域整体温度都为红色高温分布,说明凹槽微通道热沉热传导较差。因为在流体处于凹槽流动时,流体以笔直的流线流动,导致凹槽内流体形成单一稳定层流,凹槽内壁会形成较厚且稳定的热边界层,从而一定程度上限制了热沉上表面热传导能力。圆柱微通道热沉上表面的单管传热区域,红色高温分布明显缩小,说明圆柱微通道热沉的热传导能力要优于凹槽微通道热沉。由于引入了圆柱翅片,一方面使微通道上表面热源与内部换热传导途径得到扩展,并且流体流经翅片时可以产生部分绕流,从而使翅片传导下来的热量充分散入流体;另一方面通过翅片间隙扰动了流体的流线,使得部分流体可以冷热混合流动,不断打破翅片附近原有热边界层,形成新的热边界层,从而加强了热沉上表面的热传导效果。

4.3 翅片优化与分析

从结构上来说,内部带有圆柱翅片的微通道热沉具有优异的热传导效果,但加入翅片势必会影响流体的流速分布,如果流速分布不均匀会使微通道产生局部温差,局部压降不同,长时间工作情况下会出现微通道变形、崩坏等情况,所以要对圆柱微通道热沉进行流速分析并优化对比。之前的研究显示,带有倾斜角度的翅片可以很好地利用斜面促进流体产生二次流动,并且流体的二次流动会引发更多的混流效应,从而在每个斜翅表面重新初始化热边界层,不增加或稍微增加水泵功耗的情况下强化流体的换热能力。考虑斜翅片的传热优势,进一步提出了斜翅微通道如图 4(a)所

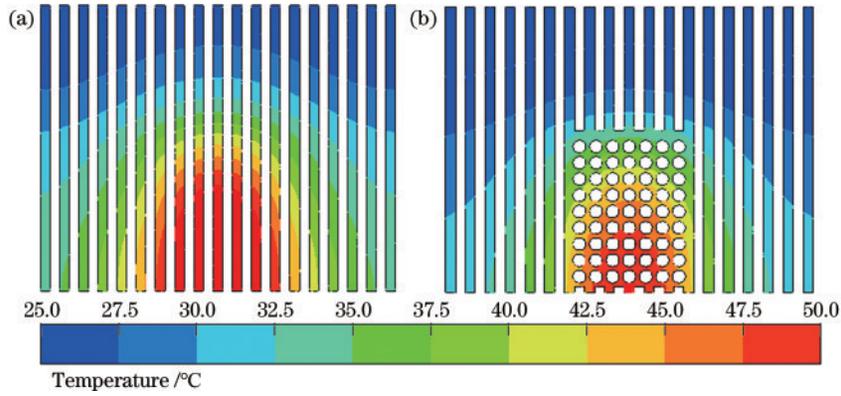


图3 两种模型微通道温度等值线热云图。(a)凹槽微通道;(b)圆柱微通道

Fig. 3 Two models of microchannel temperature contour hot cloud plot. (a) Grooved microchannels; (b) cylindrical microchannels

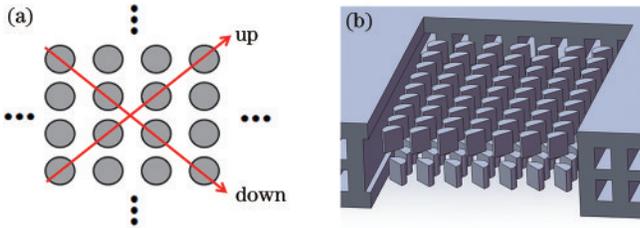


图4 斜翅微通道结构。(a)切割示意图;(b)内部剖面图

Fig. 4 Structure of the oblique wing microchannel. (a) Schematic diagram of the cut; (b) schematic of the internal planing

示。第一层微通道圆柱翅片沿圆心45°直径方向进行半圆切割,保留左半圆翅片,第二层圆柱翅片切割同理,保留右半圆翅片,由此形成上下两层斜翅微通道,其内部剖面图如图4(b)所示。

两种优化前后模型的流速仿真结果,如图5所示。由图5可知,两种微通道内部整体流速分布都比较均匀,但在翅片附近区域流线分布存在方向差异。因为圆柱翅片两侧间隙规则,所以流体流经时仅沿中间间隙单向通过。斜翅微通道由于两侧间隙不规则,使得流体存在多向性流动,从而充满整个翅片区域。斜翅微通道与圆柱微通道相比,斜翅微通道由于斜切面的二次流向形成的混流效应在翅片中心区域显示更加密集。斜翅微通道水流速最高为3.89 m/s,平均水流速集中为1.95 m/s。圆柱微通道水流速最高为3.75 m/s,平均水流速集中为1.73 m/s。二者相比,斜翅微通道整体水流速提高0.22 m/s,这是因为斜翅片的体积相比圆翅片体积缩小一半,间隔密度变大,流体所受阻力减少,流速自然有所提高。说明经过优化后的斜翅微通道,可以在不增加水泵功耗的情况下,利用不规则间隙促成流体多向性流动,在一定程度上可以提升水流速,从而强化流体的换热能力。

4.4 斜翅微通道热分析

接下来,探究斜翅微通道热沉的热传导效果及封装后各个单管的温升情况,为便于解释,将6个单管从左到右依次标记为LD1~LD6。由图6(a)等值线温度为50℃时的热分布可知,斜翅微通道热沉上表面的单

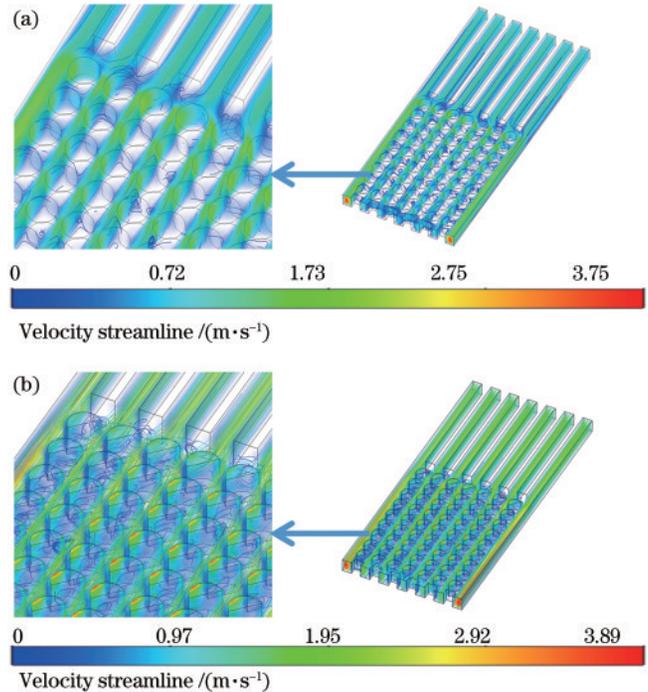


图5 优化前后流体流速云图。(a)圆柱微通道;(b)斜翅微通道
Fig. 5 Cloud maps of fluid flow velocity before and after optimization. (a) Cylindrical microchannels; (b) oblique microchannels

管传热区域最高温度呈现黄色中温分布,这与4.3节流速分析对应,斜翅微通道内部流体混流效应的增强,使得流体换热能力得到了大幅度提升,从而展现出斜翅微通道相比凹槽微通道和圆柱微通道更好的热传导效果。如图6(b)各单管出光面温升三维图所示,中间部分单管温度要高于两侧单管温度,最高单管温度为56.18℃,单管间最大温差在4℃左右,造成这种对称式温升分布是目前多单管堆叠封装不可避免的热串扰效应,最高单管激光器温度和温差完全符合单管激光器正常工作温度的要求。

前面分析斜翅片间隙的可流动性可以丰富流体流动的多向性,所以适当提升冷却液流速可以加快混流产生,从而提高微通道散热能力。但不宜过快,否

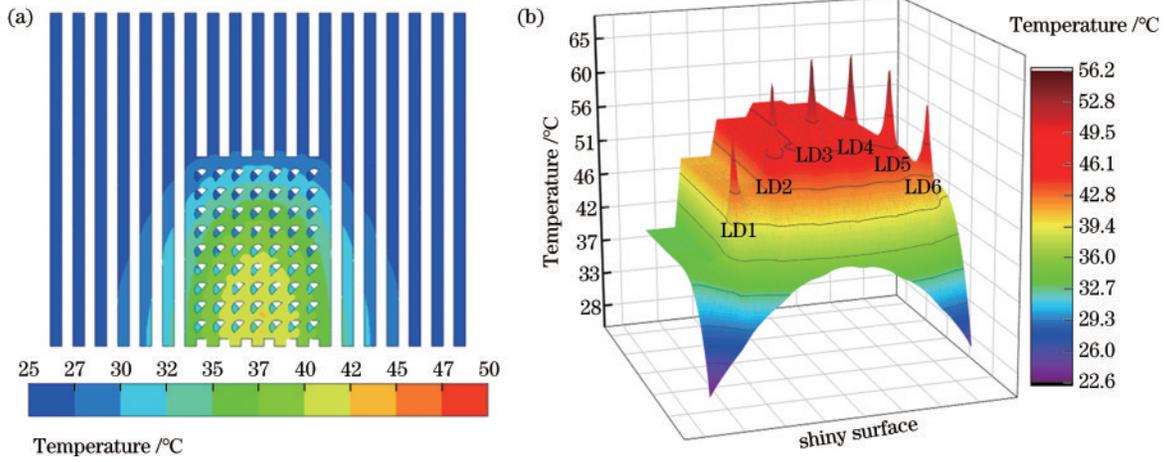


图 6 斜翅微通道封装热分析。(a)等值线温度云图;(b)各单管出光面温升图

Fig. 6 Thermal analysis of the encapsulation of inclined finned microchannels. (a) Contour temperature cloud map; (b) glossy surface temperature rise plot of each single tube

则会造成冷却液抽运水泵成本过高,同时也会造成微通道内压力损失加大^[16],严重时会导致微通道崩坏。通过水流速控制分析斜翅微通道热沉的散热情况,模拟水流速分别为 1.7、1.8、1.9、2.0 m/s。热沉表面等值温度云图如图 7 所示,随着水流速的提升,斜翅微

通道热沉表面的高温区域越来越小,整体温度趋于均匀化,说明针对斜翅微通道控制水流速适当地提升,可以有效地提高单位时间内流体的换热量,还能提高微通道热沉表面温度的均匀性,从而提高微通道热沉的工作寿命。

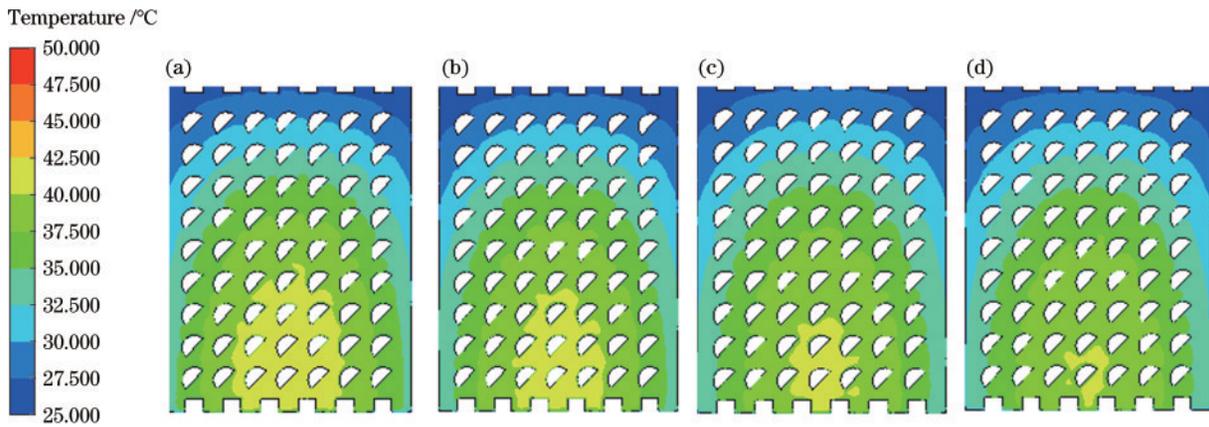


图 7 温度等值线热云图。(a)1.7 m/s 水流速;(b)1.8 m/s 水流速;(c)1.9 m/s 水流速;(d)2.0 m/s 水流速

Fig. 7 Thermal contour maps of temperature contour. (a) 1.7 m/s water velocity; (b) 1.8 m/s water velocity; (c) 1.9 m/s water velocity; (d) 2.0 m/s water velocity

接下来,探究水流速对多单管激光器的散热情况,对不同水流速下的各单管进行温度曲线分析。不同水流速各单管温度曲线如图 8 所示。可以发现:初始水流速为 1.5 m/s 时,最高单管温度为 56.18 °C,最低单管温度为 52.05 °C;水流速提升至 2 m/s 时,最高单管温度降低为 54.42 °C,最低单管温度为 50.46 °C。因此,随着水流速的提升,各单管温度得到有效降低,降低幅度为 2 °C 左右,但随着水流速的提升,各单管温度降低幅度逐渐缩减,说明水流速提升到一定程度后,对单管散热影响逐渐减小。另外,相对单管间温差来说,水流速为 1.5 m/s 时,最大温差为 4.13 °C,水流速为 2.0 m/s 时,最大温差为 3.96 °C,各单管之间温差得到

了一定平衡,说明适当地提升水流速有利于缓解各单管之间的热串扰现象,从而减少各单管之间的热积累。

4.5 功率特性分析

随着连续电流电压的持续增大,单管的输出功率发生热饱和与翻转,严重制约了多单管激光器的泵浦应用。本设计的多单管激光器电极结构的连接方式采用串联,所以在相同电流下,率先失效的单管会影响整体多单管激光器工作的可靠性。因此,通过对封装结构中接近失效时的每个单管进行最大输出功率可靠性分析具有实际意义。对半导体激光器而言,其输出功率与热阻的关系为

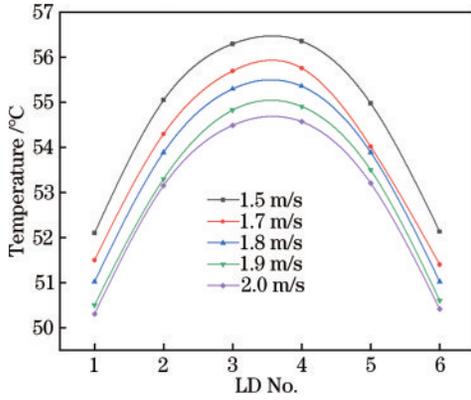


图 8 不同水流速各单管温升分布曲线

Fig. 8 Temperature rise distribution curves of each single tube with different water flow rates

$$p = \eta \exp \left[-\frac{R_{th}(IV - P)}{T_1} \right] \cdot \left\{ I - I_{Ret} \exp \left[\frac{R_{th}(IV - P)}{T_0} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中: T_1 为激光器特征温度; T_0 为热沉温度; P 为激光器的输出功率; R_{th} 为热阻; V 为激光器偏置电压; I 为工作电流; η 为激光器的斜率效率; I_{Ret} 为阈值电流。

前面分析的 6 个单管温度分布具有对称性, 为避免拟合曲线重合复杂, 取 LD1~LD3 进行最大输出功率可靠性分析, 各单管输出功率随电流变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 整体单管功率变化趋势一致, 电流加大至 30 A, 各单管输出功率逐渐达到饱和, 继续加大电流, 开始进行翻转慢慢接近失效, 但热饱和对各个单管限制有所差距, 其中 LD3 单管率先接近失效, 且最大输出功率最低, LD3 与 LD1 单管相比, 最大输出功率由 24.5 W 下降至 21.56 W, 功率降低约 2 W。多单管堆叠封装体积小化, 导致中间单管受到热串扰影响较重, 边缘单管热串扰影响较轻, 中间单管输出功率较边缘单管输出功率有所下降。因此, 中间单管是否失效对多单管激光器工作可靠性起着决定性因素, 为了保证多单管堆叠封装的工作可靠性, 应长

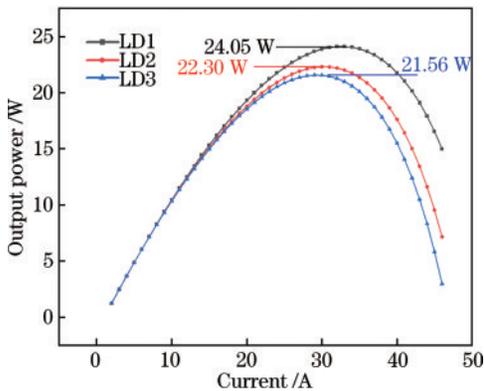
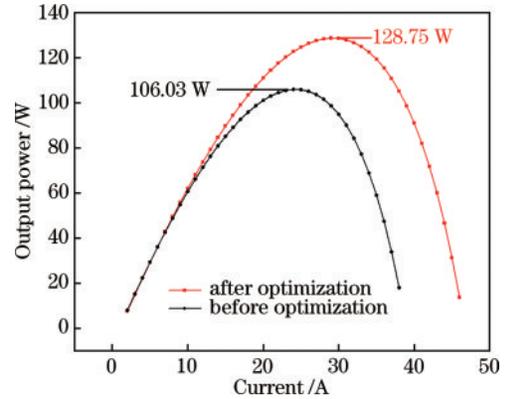


图 9 不同单管的输出功率

Fig. 9 Output power of different single tubes

期对中间单管进行有效的维护与更换。

凹槽微通道封装与优化后, 斜翅微通道封装下的多单管激光器输出功率 P - I 特性曲线如图 10 所示。对比发现, 优化后的斜翅微通道多单管激光器最大输出功率可达 128.75 W, 大于优化前的凹槽微通道多单管激光器的 106.03 W, 最大输出功率提高近 21%。

图 10 优化前后多单管半导体激光器 P - I 特性曲线Fig. 10 P - I characteristic curves of multi-tube semiconductor laser before and after optimization

5 结 论

设计了一种利用内部含有翅片的微通道热沉封装的多单管半导体激光器堆叠结构, 通过 Ansys fluent 软件进行微通道热沉封装下的流固耦合仿真。仿真结果表明: 圆柱微通道热沉与凹槽微通道热沉相比, 圆柱翅片拓展了热源传导途径, 在不增加微通道驱动泵功的前提下, 对 6 个单管半导体激光器实现了更加高效的散热; 对圆柱翅片进行 45° 斜切处理得到了斜翅微通道, 斜翅微通道与圆柱微通道相比, 流体流动方向具有多向性, 中心翅片区域混流更加密集, 流体换热能力更优越。然后探究水流速对斜翅微通道及各单管之间传热性能的影响, 水流速由 1.5 m/s 提升至 2 m/s 时, 单管最高结温由 56.18 °C 降低至 54.42 °C, 各单管之间结温差值由 4.13 °C 缩小至 3.96 °C, 说明适当提升水流速可以改善斜翅微通道热沉表面散热的均匀性, 同时有利于缓解各单管之间的热串扰效应。此外, 通过对 6 个单管的 P - I 特性曲线分析, LD1 单管功率最大 (24.05 W), LD3 单管功率最小 (21.56 W), 说明中间单管相比两侧单管更先接近失效, 应长期对中间单管进行有效的维护与更换。整体分析可得, 斜翅微通道热沉封装下的 6 个单管半导体激光器, 驱动水泵为 2 m/s 时, 可以控制多单管激光器在连续工作模式下最高结温为 54.42 °C, 最大合束输出功率可达 128.75 W, 相比凹槽微通道封装下的功率提升近 21%。本次设计仿真与分析为今后基于微通道热沉封装的多单管半导体激光器堆叠结构设计提供了可靠的依据。

参 考 文 献

- [1] 马骁宇, 张娜玲, 仲莉, 等. 高功率半导体激光泵浦源研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121010.
Ma X Y, Zhang N L, Zhong L, et al. Research progress of high power semiconductor laser pump source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121010.
- [2] 李明月, 何君. 国外军用大功率半导体激光器的发展现状[J]. 半导体技术, 2015, 40(5): 321-327.
Li M Y, He J. Development situations of high power semiconductor laser for military applications in advanced countries[J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(5): 321-327.
- [3] 王娇娇, 石琳琳, 马晓辉, 等. 多单管堆叠半导体激光器热分析及光纤耦合模拟仿真设计[J]. 发光学报, 2021, 42(1): 104-110.
Wang J J, Shi L L, Ma X H, et al. Thermal analysis and fiber coupling simulation design of multi-single emitters stacked semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(1): 104-110.
- [4] 高松信, 武德勇, 吕文强, 等. 高密度封装二极管激光器阵列[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1426-1430.
Gao S X, Wu D Y, Lü W Q, et al. High density packaging diode laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1426-1430.
- [5] Hou D, Wang J W, Zhang P, et al. High power diode laser stack development using gold-tin bonding technology [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9346: 934604.
- [6] 井红旗, 仲莉, 倪羽茜, 等. 高功率密度激光二极管叠层散热结构的热分析[J]. 发光学报, 2016, 37(1): 81-87.
Jing H Q, Zhong L, Ni Y Q, et al. Thermal Analysis of Laminated Heat Dissipation Structure of High Power Density Laser Diode[J]. Acta Luminescen Sinica, 2016, 37(1): 81-87.
- [7] 李波, 王贞福, 仇伯仓, 等. 高功率半导体激光阵列的高温特性机理[J]. 发光学报, 2020, 41(9): 1158-1164.
Li B, Wang Z F, Qiu B C, et al. High temperature characteristic mechanism of high-power semiconductor laser array[J]. Acta Luminescen Sinica, 2020, 41(9): 1158-1164.
- [8] 张冬云, 谢印开, 李丛洋, 等. 高功率半导体激光器微通道热沉的模拟优化[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202008.
Zhang D Y, Xie Y K, Li C Y, et al. Simulation and optimization of high power semiconductor laser microchannel heat sink[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202008.
- [9] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [10] Tan H, Wu L W, Wang M Y, et al. Heat transfer improvement in microchannel heat sink by topology design and optimization for high heat flux chip cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 681-689.
- [11] 曲雪健, 谢志辉, 关潇男, 等. 均匀热源条件下类叶状微通道矩形热沉的构形设计[J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 525-531.
Qu X J, Xie Z H, Guan X N, et al. Constructal design of rectangular heat sink with leaf-like microchannel under uniform heat source[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(4): 525-531.
- [12] Derakhshanpour K, Kamali R, Eslami M, et al. Improving performance of single and double-layered microchannel heat sinks by cylindrical ribs: a numerical investigation of geometric parameters[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 126: 105440.
- [13] Lee Y J, Singh P K, Lee P S. Fluid flow and heat transfer investigations on enhanced microchannel heat sink using oblique fins with parametric study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 325-336.
- [14] Jiang G S, Diao L Y, Kuang K. Understanding of laser, laser diodes, laser diode packaging and its relationship to tungsten copper[M]//Jiang G S, Diao L Y, Kuang K. Advanced thermal management materials. New York: Springer, 2012: 123-140.
- [15] Bai G Z, Zhang Y J, Liu X Y, et al. High-temperature thermal conductivity and thermal cycling behavior of Cu-B/diamond composites[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(4): 626-636.
- [16] 申利梅, 季俊杰, 罗凡, 等. 微通道冷却非均匀热流密度芯片的流动换热特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1809-1816.
Shen L M, Ji J J, Luo F, et al. Flow and heat transfer characteristics of micro-channel cooling chip at non-uniform heat flux[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6): 1809-1816.