

文章编号: 0258-7025(2009)09-2286-04

高光束质量大功率半导体激光阵列的微通道热沉

尧舜 丁鹏 刘江 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 针对现有高光束质量大功率半导体激光阵列内部发光单元条宽、填充因子不断减小,腔长不断增加的发展趋势所带来的热源分布及长度变化影响器件热阻的问题,利用分离热源边界条件结合商用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT 进行数值计算,获得微通道热沉热阻随阵列器件发光单元条宽、空间位置变化关系以及不同阵列腔长对应的微通道优化长度。根据优化参数制备获得无氧铜微通道热沉,并对宽 1 cm,腔长 1 mm,条宽 100 μm ,填充因子为 25%的半导体激光阵列进行散热能力测试,冷却器外形尺寸 27 mm \times 11 mm \times 1.5 mm。微通道热沉热阻 0.34 K/W,能够满足半导体激光阵列器件高功率集成输出的散热需求。

关键词 激光器;半导体激光阵列;微通道热沉;热阻;高光束质量

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2286

Microchannel Heatsink of High Beam Quality Semiconductor Laser Array

Yao Shun Ding Peng Liu Jiang Cao Yinhua Wang Zhiyong

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

Abstract Separate heat source profile basing on structure of semiconductor laser array is applied in thermal resistance calculation of microchannel heatsink as boundary condition. Relationships between emitter width, position and thermal resistance are presented and optimized length of microchannel at different semiconductor laser arrays' cavity length are also gotten through numerical calculation. Semiconductor laser array, with 1mm cavity length, 100 μm emitter width and 25% fill-factors is packaged on the presented microchannel heatsink and tested. With an exterior size of 27 mm \times 11 mm \times 1.5 mm, thermal resistance of microchannel heatsink reaches 0.34 K/W and matches the need of high power semiconductor laser array's cooling.

Key words lasers; semiconductor laser array; microchannel heatsink; thermal resistance; high beam quality

1 引 言

大功率半导体激光器由于体积小、重量轻、电光转换效率高、寿命长等优点,使其广泛应用于工业、军事、医疗等领域^[1,2]。随着应用需求对半导体激光输出光束质量和输出功率要求的不断提高,作为大功率半导体激光器的核心部件,半导体激光阵列(激光 bar)结构呈现出两方面变化趋势:1)减小发光单元条宽和填充因子以提高光束质量,目前 100 μm 条宽,20%填充因子激光 bar 光参数乘积(BPP)为 5.9 mm \cdot mrad,连续输出达到 180 W/bar,

5 μm 条宽,2.5%填充因子激光 bar 的 BPP 为 2.1 mm \cdot mrad,连续输出功率达 50 W/bar^[3,4]; 2)增加器件腔长以提高输出功率,现有 4 mm腔长 bar 连续输出功率接近 1000 W/bar^[5],普通商用激光 bar 腔长也由原有的 1 mm 提高为 2 mm 及其以上。

由于激光 bar 内部有源区的热管理水平直接影响器件性能和寿命^[6],微通道热沉散热技术成为支撑激光 bar 高性能工作的关键^[7]。而常用微通道热沉设计、计算模型中通常将激光 bar 理想化为均匀面热源加载到边界条件上进行计算^[8,9],该模型忽略了激

收稿日期: 2008-10-05; 收到修改稿日期: 2008-11-20

作者简介: 尧舜(1979—),男,博士,助理研究员,主要从事大功率半导体激光系统集成方面的研究。

E-mail: yaoshun@bjut.edu.cn

光 bar 内部热源分布,不能反映激光 bar 填充因子和发光单元宽度变化对整体散热效果的影响以及发光单元与微通道结构相对位置差异引起的散热性能变化。同时,激光 bar 腔长变化对微通道长度的需求影响也尚未见文献报道。本文利用商用计算流体力学 (CFD) 软件 FLUENT 进行数值计算,获得激光 bar 填充因子、空间位置变化对热阻的影响,以及不同腔长激光 bar 情况下热沉内部微通道的优化长度,在此基础上实际制备获得无氧铜微通道热沉。

2 计算模型及结果

大功率半导体激光器微通道散热结构中,激光 bar 采用 P 面朝下通过高导热焊料与热沉表面相连,有源区到热沉表面的距离很短(微米量级),热流进入热沉的“窗口”大小可认为与激光 bar 中发光单元大小相同。因此,根据激光 bar 实际填充因子和条宽将其视为分离面热源加载到微通道热沉表面,如图 1 所示。

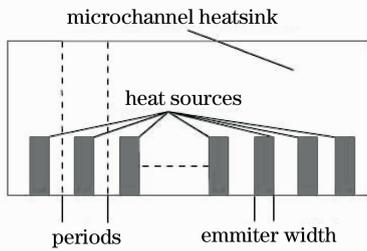


图 1 分离热源模型

Fig. 1 Separate heat source model

热沉内部微通道区域为多通道并联散热结构,通道内水流方向平行于激光 bar 腔长方向,由于激光 bar 位于热沉前端微通道区域上方,器件内部产生热量主要通过微通道区域与冷却水进行热交换,因此忽略微通道区域以外部分对散热的影响而仅对微通道区域进行建模计算,如图 2 所示。计算中结合文献[10]结果和加工圆整化要求,选择微通道结构周期 0.4 mm,其中微通道壁厚、微通道宽度均为 0.2 mm,垂直方向上各层厚度均为 0.3 mm。利用商用 CFD 软件 FLUENT 对该模型进行数值传热计算,热沉材料为无氧铜,冷却水流量为 0.3 L/min,计算中冷却水取 25 °C 时常物性。

图 3 为计算得到激光 bar 腔长 1 mm 时,热阻随发光单元条宽、填充因子变化曲线,其中热阻为激光 bar 内发光单元平均温升与发热量之商。由图 3 可知,热阻随发光单元宽度、填充因子的增大而迅速减小并逐渐趋于饱和,这是由于相同发热量情况下,激

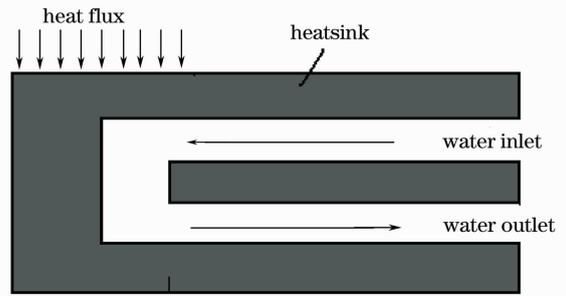


图 2 微通道计算模型截面图

Fig. 2 Model of microchannel heatsink

光 bar 发光单元宽度、填充因子越小则热源更加集中,热沉内部的扩散热阻越大。对于传统激光 bar,填充因子大于 30% 时,热阻与均匀面热源边界条件下(100% 填充因子)热阻相差小于 10%,而当填充因子小于 12.5% 时,采用均匀面热源条件计算误差大于 20% 且误差随填充因子降低迅速增大,当填充因子为 2.5% 时,误差更是大于 70%,因此对于低填充因子激光 bar 必须采用分离热源模型进行计算。

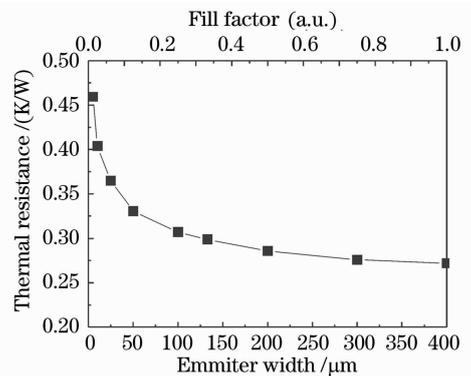


图 3 发光单元宽度和填充因子与热阻的关系曲线

Fig. 3 Relationships between emitter width, fill factor and thermal resistance

对于低填充因子激光 bar,其内部发光单元宽度远低于微通道热沉周期长度,发光单元位于热沉表面不同位置时的散热一致性对于激光 bar 的高性能工作是至关重要的。图 4 为计算得到 1 mm 腔长,发光单元宽度为 10 μm 激光 bar 位于热沉表面不同位置时的热阻变化曲线,其中,横坐标为发光单元中心距离微通道周期边缘距离与微通道周期长度的商。根据单个微通道周期内部结构的对称性,只计算单个发光单元在微通道周期表面一半距离范围内的位置变化情况。考虑到无氧铜微通道热沉的周期通常介于 400 μm 和 600 μm 之间,因此采用这两种结构进行计算,其他参数同前。计算结果表明,发光单元位于微通道周期中央位置时热阻稍低于微通道周期边缘(散热脊正上方),这是由于微通道周期

中央位置热源更靠近冷却水;同时,这种差别非常小,采用 $600\ \mu\text{m}$ 周期微通道结构时,热阻差仅为 $0.04\ \text{K/W}$,对于 $400\ \mu\text{m}$ 周期微通道结构这种差异则更小,在现有的激光 bar 发热量条件下可忽略不计。因此,即使采用低填充因子激光 bar,其内部热源与微通道的相对空间位置分布对整体散热性能影响不大,同时也降低了封装过程中对激光 bar 慢轴方向上的定位精度要求。

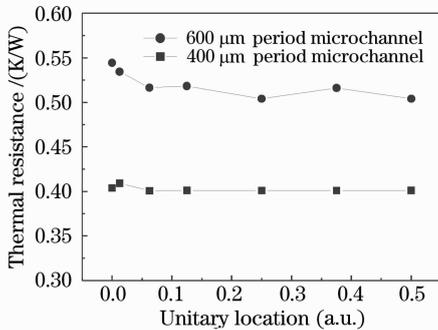


图 4 热阻与发光单元位置关系曲线

Fig. 4 Thermal resistance of heatsink at different emitter location

图 5 是计算得到的微通道长度变化对热阻的影响,其中横坐标是微通道长度减去激光 bar 腔长的值。由图 5 可以看出随着微通道长度的增加热阻减小并趋于饱和,随着激光 bar 腔长的增加这种趋势逐渐减小,这主要是由于当腔长和微通道长度较小时,激光 bar 下方微通道热沉结构中前端壁厚和水流折转区占据比例较大,散热较差,导致热量不能直接向下散出进而向后方扩散,因此加大微通道长度有助于减小整体热阻。而当激光 bar 腔长比较大时,微通道折转区域与微通道长度相比较小,激光 bar 中热量直接通过下方微通道散出,继续增加微通道长度对提高散热性能贡献不大。因此对于长腔长器件,微通道长度与腔长相当即可,而短腔长器

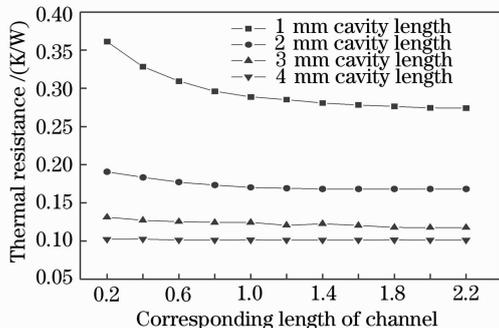


图 5 热阻随微通道长度的变化曲线

Fig. 5 Thermal resistance of heatsink at different microchannel length

件,微通道长度则应该比腔长大 $2\ \text{mm}$ 以上。

图 6 是计算得到的 $400\ \mu\text{m}$ 周期微通道热沉,微通道长度为 $3.2\ \text{mm}$,激光 bar 发光单元条宽 $100\ \mu\text{m}$,填充因子 25% ,输出功率 $80\ \text{W}$,电光转换效率 60% 情况下,工作时微通道热沉表面温升及内部截面温升图,其中冷却水入口温度 $298\ \text{K}$,计算中忽略了热沉两侧结构对热传导的影响,热阻约为 $0.31\ \text{K/W}$ 。

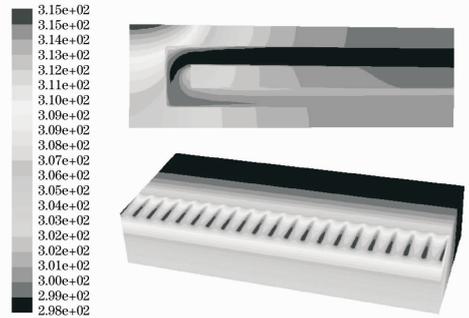


图 6 计算得到的激光 bar 工作时热沉及微通道内部温度的分布图

Fig. 6 Temperature profile of heatsink surface and microchannel

3 微通道热沉的制备及测试

根据计算结果参数制备无氧铜微通道热沉,单个微通道热沉尺寸为 $27\ \text{mm} \times 11\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 。实验用国产 AlGaAs/GaAs 激光 bar 宽 $1\ \text{cm}$,腔长 $1\ \text{mm}$,条宽 $100\ \mu\text{m}$,填充因子为 25% ,电流为 $40\ \text{A}$ 时,额定中心波长 $808\ \text{nm}$,用钢将其焊接到微通道热沉表面并进行通电测试。图 7 为冷却水温为 $300\ \text{K}$ 条件下激光 bar 的 $P-I$, $U-I$ 及电光转换特性曲线和电流分别为 $15\ \text{A}$, $55\ \text{A}$ 时激光 bar 输出光谱曲线。由图 7 可看出当电流小于 $55\ \text{A}$ 时,bar 的输出功率随电流线性增长,而电流大于 $55\ \text{A}$ 时 $P-I$ 曲线趋于平坦,此时输出激光中心波长仅为 $807.8\ \text{nm}$,小于额定中心波长,且激光 bar 在 $55\ \text{A}$ 下工作 $30\ \text{min}$ 后,中心波长不变,表明微通道热沉对激光 bar 散热良好, $55\ \text{A}$ 后 $P-I$ 曲线斜率变化是由于激光 bar 输出功率饱和而不是由于热反转造成。

根据定义,器件整体热阻 R_{th} 可表示为

$$R_{\text{th}} = \Delta T / \Delta W = (\lambda_1 - \lambda_2) / A(W_1 - W_2),$$

式中 ΔT 为温度变化量, ΔW 为热功率变化量, $\Delta\lambda$ 为波长变化量, A 为激光 bar 温漂系数。实际中采用 AlGaAs/GaAs 激光 bar, A 取 $0.3\ \text{nm/K}^{[11]}$, 根据 $15\ \text{A}$ ($804.3\ \text{nm}$) 和 $55\ \text{A}$ ($807.8\ \text{nm}$) 时激光 bar

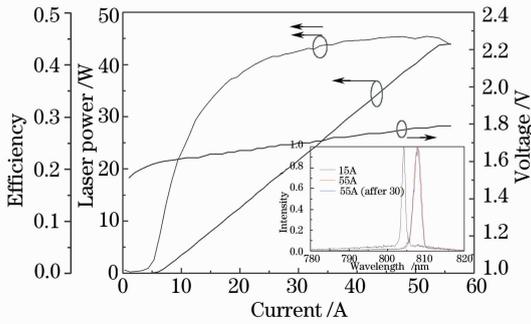


图7 激光 bar $P-I, U-I$ 及电光转换效率
以及 15 A, 55 A 时输出光谱曲线图

Fig. 7 $P-I, U-I, E-O$ efficiency profile and spectrum
profile at different current of laser bar

输出光谱中心波长的变化以及热功率变化量得到器件整体热阻为 0.34 K/W。该值略大于数值计算得到的 0.31 K/W, 主要是由于计算中忽略了激光 bar 自身的热阻、焊料热阻、界面热阻以及微通道制作过程中由于加工误差所产生的附加热阻。

4 结 论

利用分离热源边界条件结合商用 CFD 软件 FLUENT 对微通道热沉热阻进行数值计算, 获得激光 bar 填充因子、发光单元位置对微通道热沉热阻的影响, 对不同腔长激光 bar 条件下的微通道长度进行优化计算, 为具有高光束质量的低填充因子、长腔长激光 bar 的微通道热沉设计、制备提供数值依据, 并根据计算结果制备获得尺寸为 $27 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的无氧铜微通道热沉。该热沉对 1 mm 腔

长, 条宽 $100 \mu\text{m}$, 填充因子为 25% 激光 bar 进行散热, 热阻为 0.34 K/W, 能够满足大功率激光 bar 散热、集成需求。

参 考 文 献

- 1 Harald König, Günther Grönninger, Peter Brick *et al.*. Brilliant high power laser bars for industrial applications[C]. *SPIE* 2008, **6876**: 687616
- 2 Norbert Lichtenstein, Martin Krejci, Yvonne Manz *et al.*. Recent developments for BAR and BASE: Setting the trends[C]. *SPIE* 2008, **6876**: 68760c
- 3 N. Lichtenstein, Y. Manz, J. Müller *et al.*. High brightness laser diode bars[C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 61040e
- 4 Markus Revermann, Andre Timmermann, Jens Meinschien *et al.*. Efficient high-brightness diode laser modules offer new industrial applications[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 6456Q
- 5 Hanxuan Li, Terry Towe, Irving Chyr *et al.*. Near 1 kW of continuous-wave power from a single high-efficiency diode-laser bar[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13): 960~962
- 6 P. Unger. Introduction to Power Diode Lasers [M]. Berlin: Springer, 2000. 289~299
- 7 Michael Leers, Konstantin Boucke, Christian Scholz *et al.*. Next generation of cooling approaches for diode laser bars[C]. *SPIE*, 2006, **6456**: 64561A
- 8 Thomas Ebert, Wilhelm Meiners, Markus Pajunk. Non corrosive micro coolers with matched CTE[C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 610401
- 9 Lü Wenqing, Tu Bo, Wei Bin *et al.*. Micro-channel heatsink module for high power diode laser [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, **17**(2): 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**(2): 83~86
- 10 E. C. Yu, A. J. Przekwas. Thermomechanical design of a microchannel cooled semiconductor laser diode array package[C]. *SPIE*, 1999, **3625**: 535~542
- 11 Scott A. Merritt, Peter J. S. Heim, Si Hyung Cho *et al.*. Controlled solder interdiffusion for high power semiconductor laser diode die bonding. [J]. *IEEE Tran. Comp. Pack.*, 1997, **20**(2): 141~145