

千瓦级传导冷却半导体激光器阵列热特性

朱其文^{1,2}, 张普¹, 吴的海¹, 聂志强¹, 熊玲玲¹, 刘兴胜^{1,3}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西安炬光科技有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要: 随着半导体激光器输出功率的进一步提高, 热管理已经成为制约其性能和可靠性的关键瓶颈之一。利用有限元方法对千瓦级高功率传导冷却型(G-Stack)半导体激光器阵列的热特性进行数值模拟与分析。结果表明工作脉宽大于 250 μs 时器件各发光单元之间会发生严重的热串扰现象。在横向及垂直方向的热量分别为 64.7% 与 35.3%, 横向方向热阻的 74.9% 及垂直方向热阻的 66.5% 来自 CuW, 表明 CuW 对于激光器的散热性能有着决定性的影响。实验测试了器件在不同占空比条件下的光谱特性, 得到工作频率分别为 20、30、40 Hz 相对 50 Hz 的温差分别为 2.33、1.56、0.78 $^{\circ}\text{C}$, 根据累积平均温度法计算得到的温差分别为 2.13、1.47、0.75 $^{\circ}\text{C}$, 理论模拟结果相对于实验结果的平均误差小于 6.85%, 结果表明理论模拟结果和实验瞬态热阻基本吻合。

关键词: 千瓦级; 半导体激光器阵列; 传导冷却; 热特性; 有限元

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1005003

Thermal characteristics of kW-level conduction-cooled semiconductor laser array

Zhu Qiwen^{1,2}, Zhang Pu¹, Wu Dihai¹, Nie Zhiqiang¹, Xiong Lingling¹, Liu Xingsheng^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Focuslight Technologies Co., LTD, Xi'an 710119, China)

Abstract: With the increase in output power of high power semiconductor lasers (HPSSLs), thermal management is one of the critical bottlenecks affecting the optical-electrical performance and reliability of HPSSLs. Thermal characteristics of a kW-level conduction cooled semiconductor laser array were analyzed based on numerical simulations and experiments. Firstly, transient thermal behavior was studied using finite element method (FEM). There is significant "thermal crosstalk" behavior among the semiconductor laser bars with pulse width greater than 250 μs . It shows thermal resistances along horizontal and vertical directions are 64.7% and 35.3%, respectively, indicating that heat mainly dissipates along horizontal

收稿日期: 2017-02-09; 修订日期: 2017-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61334010, 61404172)

作者简介: 朱其文(1993-), 男, 硕士生, 主要从事高功率半导体激光器封装方面的研究。Email: zhuqiwen@opt.cn

导师简介: 张普(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率半导体激光器封装技术及可靠性研究。Email: zhangpu@opt.ac.cn

direction. 74.9% of thermal resistance along horizontal direction and 66.5% of thermal resistance along vertical direction origin from CuW layer, which shows that CuW is the most significant factor affecting the efficiency of thermal dissipation. Based on accumulated average temperature method, the simulated temperature differences are 2.13, 1.47, 0.75 °C at the repetition frequencies of 20, 30 and 40 Hz compared with that at the frequency of 50 Hz. Average junction temperature rises at different repetition frequency have been measured using spectral method, and the temperature differences at the repetition frequencies of 20, 30 and 40 Hz are 2.33, 1.56, 0.78 °C, respectively. The average error is less than 6.85% between experiment results and numerical simulation. It shows that the simulated transient thermal resistance is coincident with the experimental result.

Key words: kW-level; semiconductor laser array; conduction-cooled; thermal characteristic; finite element

0 引言

高功率半导体激光器 (High Power Semiconductor Lasers, HPSLs) 由于其体积小, 重量轻, 电光转换效率高, 可靠性高和寿命长的优点, 在固体与光纤激光器泵浦、科研、工业加工、航空航天等领域应用越来越广泛^[1-4]。随着半导体激光器输出功率的增加, 热管理已经成为限制激光器性能的关键瓶颈之一。目前典型的 808 nm 半导体激光器的电光转换效率通常为 50%~55%, 在半导体激光器工作过程中, 约 45%~50% 的电能被转换为废热^[5]。如果激光器所产生的热量不能及时排出, 将导致结温显著升高, 进而导致半导体激光器的阈值电流变大, 内量子效率显著下降, 器件的电光转换效率降低, 从而产生更多的热量^[6]。结温升高还将导致激光器的发射波长发生红移, 对于 808 nm 激光器, 结温每升高 1 °C, 波长增加约 0.28 nm^[7]。另外, 器件的温度分布不均匀也会导致光谱展宽。结温升高不仅会导致激光器特性变差、输出功率降低, 而且会导致器件的寿命以指数形式减小^[8]。

近年来, 高功率传导冷却型 (G-Stack) 半导体激光器阵列由于能够应用于高温和低温等恶劣环境条件, 已经受到越来越多的关注。相对于液体制冷半导体激光器, 传导冷却半导体激光器的散热效率相对较低, 因此热管理成为限制传导冷却型高功率半导体激光器性能提高的一个重要因素。关于其热特性的研究, 对于提高适用于极端环境工作的传导冷却

半导体激光器阵列的散热能力, 降低有源区温升, 提高输出功率、电光转换效率、光谱性能及可靠性具有重要的意义。

文中以在全固态激光泵浦、工业加工、激光测距、激光雷达等领域具有广泛应用前景的千瓦级传导冷却半导体激光器阵列为研究对象, 利用有限元方法分析了器件工作在瞬态条件下的热特性, 对组成阵列的巴条之间的热串扰行为进行了系统分析。利用累积平均温度法, 对器件工作在相同脉宽不同频率下的温度分布及器件热阻的分布进行了分析; 利用光谱法实验测量了器件在不同重复频率下的有源区平均温升及达到热平衡状态下的热阻, 并将数值模拟结果与实验测量结果进行了对比分析。

1 模型建立与模拟条件

图 1 为 G-Stack 半导体激光器阵列的结构图、样品及模拟仿真所用的有限元模型。图 1(a) 中器件由热沉、激光器巴条、铜钨次热沉、铜正负极以及氮化铝绝缘层组成, 并使用金锡焊料封装。激光器巴条的厚度为 131.3 μm, 填充因子为 90%, 腔长 1.5 mm, 巴条宽度为 1 cm。激光器模拟中各层结构参数如表 1 所示, 各层材料热物性参数如表 2 所示。G-Stack 器件根据输出功率的需求一般可以由 2~10 个巴条串联而成, 文中所研究的 G-Stack 半导体激光器阵列有 5 个巴条, 单巴条峰值功率为 250 W, 总峰值输出功率为 1 250 W。

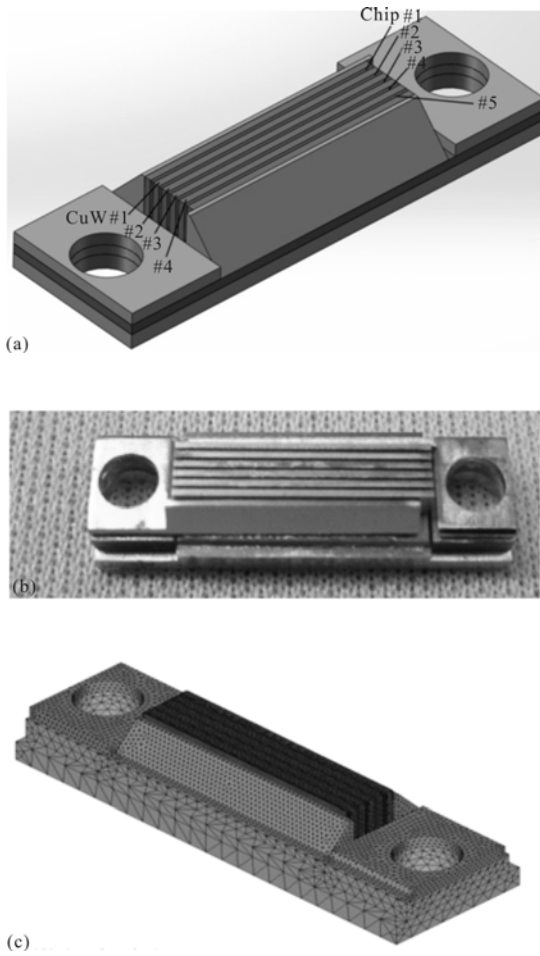


图 1 5 巴条 G-Stack 半导体激光器阵列结构示意图(a)、实物图(b)和有限元模型(c)

Fig.1 Schematic structure(a), picture of real products(b) and the finite element model(c) of 5 bar G-Stack semiconductor laser array

表 1 半导体激光器阵列结构参数

Tab.1 Structure parameters of diode laser array

Each layer of chipset	Length/ μm	Width/ μm	Thickness/ μm
AuSn solder	10 000	1 500	5
Au/Pt/Ti	10 000	1 500	0.7
GaAs substrate	10 000	1 500	187.99
Following cladding layer and waveguiding layer	10 000	1 500	1
GaAlAs active region	10 000	1 500	0.01
Cladding layer and waveguiding layer	10 000	1 500	1
Ohmic layer	10 000	1 500	0.2
CuW	10 000	1 750	300

表 2 模拟中使用的材料特征参数

Tab.2 Material properties used in simulations

Material	Thermal conductivity / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Specific heat / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Cu	398	8.930×10^3	384.56
CuW	170	1.66×10^4	156
AlN	180	3.26×10^3	738
$\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$	57.3	1.972×10^4	129
Au	301	1.932×10^4	128.74
SiO_2	1.95	2.2×10^3	841
GaAlAs	13.7	4.852×10^3	366
GaAs(active area)	66	5.32×10^3	370
GaAs(substrate)	50	5.316×10^3	325

模拟时所采用的边界条件及假设设定如下^[9-11]:

在工作过程中,废热主要是从芯片的有源区产生,铜电极和 CuW 次热沉产生的焦耳热很少,因此把所有热源集中在巴条各发光点的有源区,同时假定热流密度均匀分布。每个半导体激光器巴条的峰值输出功率为 250 W,巴条的电光转换效率为 50%,因此,单个巴条所产生的热功率为 250 W。由于传导冷却半导体激光器阵列通常工作于较低占空比,器件整体温度变化不大,故假定每种材料的参数不随温度变化,所有的材料均假设为各向同性。G-Stack 器件在工作过程中底部安装于热电冷却器(TEC),热沉底部温度设定并固定为 25℃。整个模型在模拟过程中不考虑空气对流和热辐射,即巴条和散热器暴露在空气中的所有面被视为绝热条件。

为了方便表述,如图 1(a)所示,规定与电极焊接第一个 bar 条为 #1 bar,从前到后依次命名,处于中心的 bar 条为 #3 bar;对于 CuW 块的命名与此类似,如处于 #1 与 #2 bar 之间的为 #1 CuW 块,以此类推命名。

2 结果及讨论

2.1 巴条间热串扰行为分析

半导体激光器的工作参数,诸如脉冲宽度、脉冲电流大小、重复频率等对高功率半导体激光器阵列的性能有很大影响。为了选择合适的参数,需要对 G-Stack 半导体激光器阵列工作时的瞬态热行为进行研究。模拟计算了 G-stack 器件在输出功率为 1 250 W,连续工作 0.01 s 条件下的温度变化。图 2 为在不同时间点(50、100、200、400、500、1000 μs)下的器

件温度分布云图。当电流持续时间小于 100 μs 时,相邻两个巴条之间的 CuW 块的温升非常小,且相邻巴条之

间没有发生“热串扰”;当电流持续时间大于 100 μs 之后,相邻两个巴条之间的 CuW 块温升显著增加。

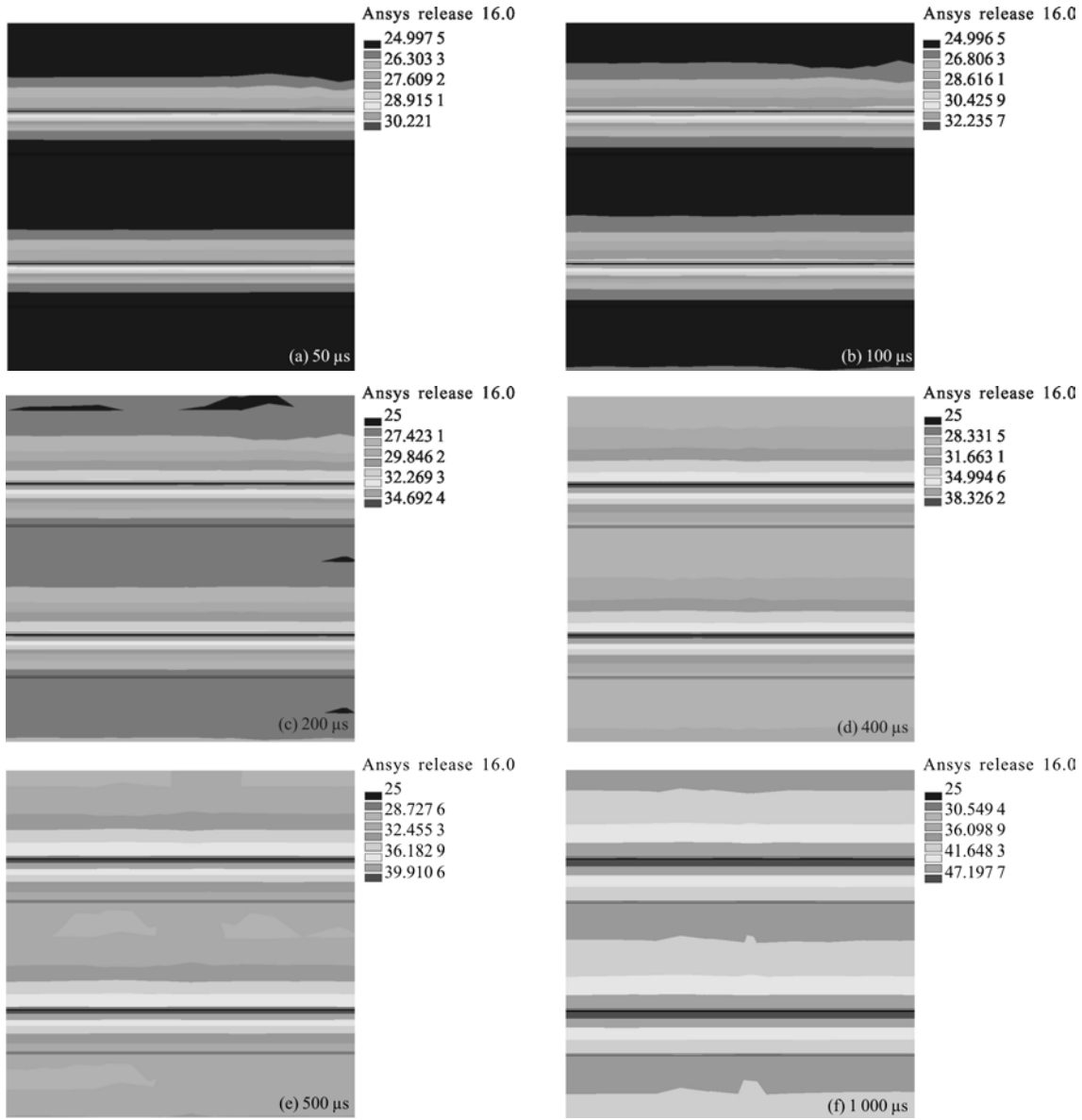


图 2 G-Stack 半导体激光器阵列从 50~1 000 μs 不同时刻的瞬态温度分布

Fig.2 Transient temperature distribution of G-Stack semiconductor laser array at different time points from 50~1 000 μs

图 3 为 G-Stack 器件输出功率为 1 250 W、连续

工作 0.01 s 时阵列各巴条和各巴条之间的 CuW 块温度随时间的变化曲线。由图可知,巴条在 0.01 s 时还没有达到稳态导热阶段,但温度已高达 125 °C。由此可见在输出功率为 1 250 W 的情况下 G-Stack 半导体激光器只适用于低占空比模式下工作。

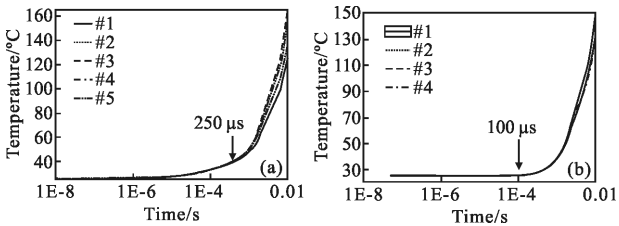


图 3 各巴条(a)与各巴条间的 CuW 块(b)中心位置的瞬态温度变化
Fig.3 Transient temperature profiles in the center of each diode laser bar (a) and CuW submount (b)

在 0~0.01 s 工作过程中的非稳态导热过程温度随时间变化关系如下:

在 0~100 μs 之间,各 bar 条有源区温升速率基本相同,且各巴条间的 CuW 块中心位置温度保持在初始温度 25 °C,未出现明显变化;100 μs 之后,各巴

条间的 CuW 块中心的温度开始缓慢升高。因此可知, 约在 100 μs 时, 相邻巴条的热量恰好传递到各巴条间 CuW 块的中心位置。因此如果此器件在准连续波(QCW)模式下工作, 其输出峰值功率为 1 250 W 时, 脉冲宽度小于等于 100 μs 情况下, 阵列内没有热积累及热串扰发生, 阵列内部相邻巴条的热特性完全独立几乎相同, 与单巴器件的热特性基本相似。在 100~250 μs 范围内, 热量继续扩散与传播, 各巴条间 CuW 块的温度开始明显以相同的速率开始明显的上升。同时, 在此阶段内各巴条的温度升高速率仍然保持一致, 并没有因热量扩散而产生差异。约 250 μs 之后, 各巴条的温升速率逐渐出现不同, 且各巴条与巴条间 CuW 块温升速率显著变大, 说明在此阶段内, 各巴条之间开始发生热串扰。换言之, 当器件工作于 QCW 模式、脉冲宽度大于等于 250 μs 时, 阵列内各巴条之间开始发生热串扰行为, 各巴条的温度一致性开始发生破坏。因此, 该结构设计的器件适用于脉宽不大于 250 μs 的 QCW 工作模式。

2.2 不同重复频率条件瞬态热分析

由以上分析可知, 器件的工作脉宽为 250 μs 时, 器件开始有微小的热串扰发生。因此有必要对其在不同的频率下工作时各巴条的温度分布进行分析。图 4 为 G-Stack 半导体激光器阵列分别在 20 Hz 频率下工作 1 s 过程中有源区的最高温度变化曲线。可以看出激光器在开始几个脉冲周期内温度上升, 到第 10 个脉冲之后激光器结温基本达到了动态平衡的状态, 因此在分析激光器的瞬态热行为的时候, 选前 10 个脉冲周期进行分析。

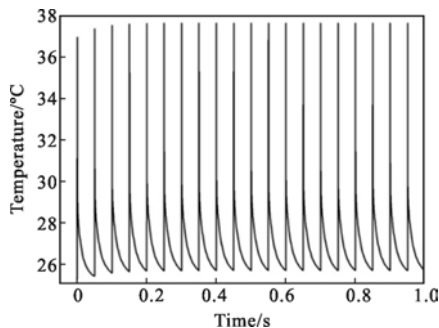


图 4 器件在占空比为 0.5%(20 Hz, 250 μs)工作 1 s 的有源区瞬态温度变化曲线

Fig.4 Transient temperature profiles of active region when the device worked with 0.5% duty cycle(20 Hz,250 μs)

图 5 给出了 G-Stack 半导体激光器阵列分别在 20、30、40、50 Hz 频率下工作时第 10 个脉冲内各巴条的温度曲线。由图中可知, 重复频率越高, 巴条的温度越高, 各巴条的温度不均匀性也逐渐增加。在第 10 个脉冲周期内, 当占空比为 0.5%, 0.75%, 1% 和 1.25% 时, 巴条有源区的最高温度分别为 37.59、38.30、39.08、39.91 $^{\circ}\text{C}$ 。由于通常认为高功率半导体激光器的最合适的结温低于 40 $^{\circ}\text{C}$ ^[12], 因此, 在小于 1.25% 的占空比条件下, 可以实现更好的性能和更高的可靠性。

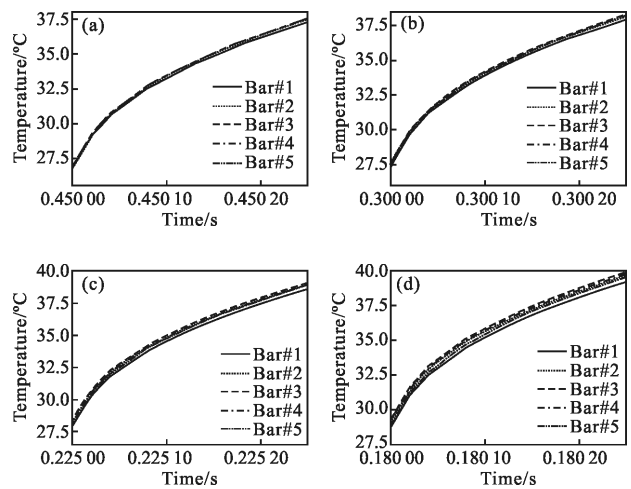


图 5 器件分别在 20、30、40、50 Hz 频率下工作下第 10 个脉冲内各 bar 条中心位置的瞬态温度变化

Fig.5 Transient temperature profiles of each bar of central position when the device worked under 20, 30, 40 and 50 Hz frequency of the tenth pulse respectively

图 6 为器件在底部热沉为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、占空比为 1.25%(250 μs , 50 Hz) 下工作时第 10 个脉冲不同方向的温度分布曲线。器件垂直方向温度分布曲线揭示了在该器的每一层中的温升情况。图 6(b)显示了器件水平方向温度分布。由图可知, 沿巴条叠阵方向上, 器件温度呈现与器件叠阵结构相同的周期性变化, 温升主要在巴条的有源区, 最高为 39.91 $^{\circ}\text{C}$, 各巴条的温度呈现出均匀性。同时各巴条间的 CuW 块温升最低, 并且温度迅速降低。在垂直方向上, 根据曲线可以清晰看出器件在垂直方向的结构变化: 在热沉部位温升很小, 靠近芯片部分的 CuW 块温度迅速升高。通过对不同方向的温度分布分析可以得到横向方向热阻的 74.9% 与 25.8% 分别来自 CuW 和巴条。垂直方向热阻的 20.3%, 13.2% 和 66.5% 分别

来自热沉、绝缘层和 CuW。计算得出在横向及垂直方向上热量分别占 64.7%与 35.3%。由此得知 G-Stack 器件大部分热量通过横向传导,垂直方向上热量传导较少。为了对器件结构进行优化,可以增加 CuW 层的厚度或者使用热导率更高且 CTE 匹配的材料替换 CuW,如铜-金刚石复合材料等。

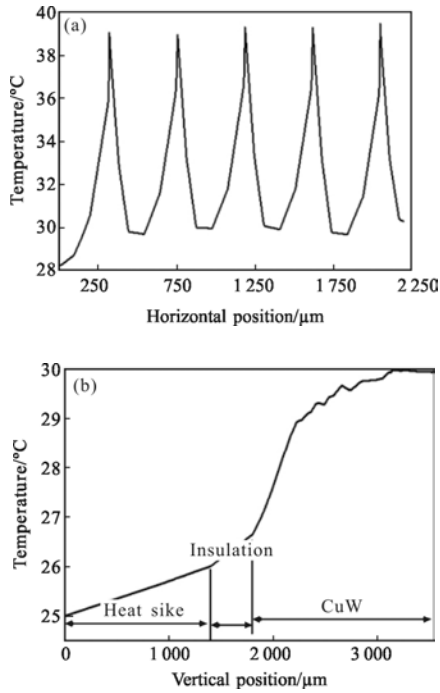


图 6 器件的水平和垂直温度分布曲线

Fig.6 Horizontal and vertical temperature profile of the G-Stack

2.3 实验结果与分析

利用波长漂移方法,对 G-Stack 封装 808 nm, 1 250 W 传导冷却型半导体激光器阵列在占空比为 1.25%(250 μs, 50 Hz) 工作条件下测量其光谱特性,热沉温度分别为 25 °C和 40 °C时得到的光谱特性如图 7(a)所示。由此可以得到波长随温度变化的漂移系数 $\Delta\lambda/\Delta T$ 为 0.27 nm/°C。然后在脉宽 250 μs 频率

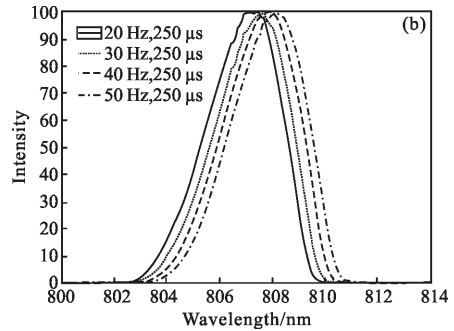
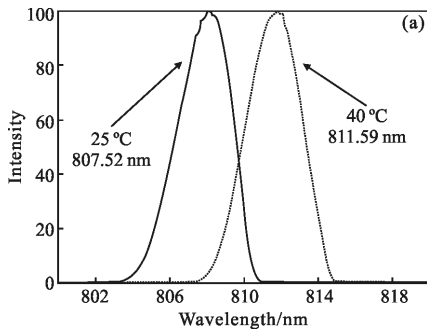


图 7 占空比为 1.25%(250 μs, 50 Hz)不同温度下(a)和热沉温度 25 °C时不同占空比下(b)的光谱特性曲线

Fig.7 Measured spectrum curves of semiconductor laser array at different temperature with 1.25% duty cycle(250 μs, 50 Hz)(a) and different duty cycle with 25 °C (b)

分别为 20、30、40、50 Hz 条件下工作对器件进行光谱测试。图 7(b)为器件在不同占空比下工作的光谱特性,它们的中心波长分别为 806.89、807.1、807.31、807.52 nm, 光谱的半峰全宽 (FWHM) 分别为 3.401、3.436、3.487、3.525 nm。可以看出重复频率越高,占空比越大,实验测量的 FWHM 也越大。

在实验过程中,测量的光谱是长时间积分平均结果,相对应的温度应该也是长时间平均温度,而不是峰值温度。对图 5 的升温曲线进行时间积分求平均,得到的结果如表 3 所示,可以看出随着频率的升高,bar 条的平均温度也上升,各巴条的温度不均匀度也变大。

表 3 不同工作条件下,各巴条的平均温度及平均偏差计算结果(单位:°C)

Tab.3 Calculation results of the average temperature of each bar and the average deviation under different conditions(Unit: °C)

Frequency	50 Hz	40 Hz	30 Hz	20 Hz
#1	35.476	34.827	34.187	33.587
#2	35.900	35.124	34.379	33.699
#3	36.114	35.283	34.492	33.778
#4	35.986	35.192	34.432	33.741
#5	35.735	35.041	34.366	33.741
Average of 5 bars	35.842	35.094	34.371	33.709
Standard deviation	0.220 7	0.155 4	0.102 2	0.065 9

根据图 7 中心波长差和实验测得的波长漂移系数计算得出脉宽为 250 μs 频率分别为 20、30、40 Hz

相对 50 Hz 的温差分别为 2.33、1.56、0.78 °C,而模拟的平均温度对应的温差分别为 2.13、1.47、0.75 °C。与实验结果相比,理论计算得到的温度比实验测试结果小 6.85%。

在 QCW 模式下工作时,器件的有源区温度是处于动态热平衡,相应的热阻 $R_{\text{transient}}$ 可以表示为:

$$R_{\text{transient}} = \frac{T_1 - T_2}{Q_1 - Q_2} \quad (1)$$

式中: Q_1, Q_2 分别为不同工作条件下的热功率; T_1 为 Q_1 对应下的有源区平均温度; T_2 为 Q_2 对应下的有源区平均温度。

根据公式(1)计算得到的实验及模拟的热平衡状态下的热阻分别为 0.25 K/W 和 0.23 K/W,二者的结果基本吻合。理论模拟得到的结果略小于实验测试结果,主要是由于模拟过程中没有考虑串联电阻和材料内部的缺陷,以及层与层之间的接触热阻等因素。

3 结 论

针对千瓦级高功率传导冷却半导体激光器阵列热管理瓶颈问题,利用有限元方法模拟分析了高功率密度传导冷却型(G-Stack)半导体激光器阵列在不同工作条件下的瞬态温度分布,对器件内部各巴条间的热串扰行为进行了分析与研究。在 0~100 μs 之间,各巴条有源区温升速率基本相同,在 100~250 μs 范围内各巴条间 CuW 块的温度以相同的温升速率开始明显的上升但各巴条的温升速率仍然保持一致。250 μs 之后,各 bar 条的温升速率逐渐出现不同,且各巴条与各巴条间 CuW 块温升速率显著变大。

热量传导在器件的横向及垂直方向分别占 64.7%与 35.3%,G-Stack 器件大部分的热量在横向传导,垂直方向上热量传导较少。横向方向热阻的 74.9%及垂直方向热阻的 66.5%来自 CuW,表明 CuW 对于激光器的散热性能有着决定性的影响。分别根据累积平均温度法及光谱实验方法分别得到了不同占空比条件下的温差及瞬态热平衡状态下的热阻,结果表明实验及模拟得到瞬态热阻的结果基本吻合。该研究结果对优化半导体激光器热设计,提高半导体激光器的光电性能及可靠性提供了有益指导。

参考文献:

[1] Liu Xingsheng, Martin H Hu, Caneau C G, et al. Thermal

management strategies for high power semiconductor pump lasers[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2006, 29(2): 268-276.

[2] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (2): 189-194. (in Chinese)

[3] Tian Kun, Zou Yonggang, Ma Xiaohui, et al. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 51-64. (in Chinese)

[4] Huang Haihua, Liu Yun, Yang Ye, et al. Temperature characteristics of 850 nm tapered semiconductor lasers [J]. *Chin Opt*, 2013, 6(2): 201-207. (in Chinese)

[5] Quan Wei, Li Guanghui, Chen Xi, et al. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1080-1086. (in Chinese)

[6] Liu Xingsheng, Zhao Wei, Xiong Lingling, et al. Packaging of High Power Semiconductor Lasers [M]. New York: Springer, 2014.

[7] Zhang Zhiyong, Zhang Pu, Nie Zhiqiang, et al. Thermal crosstalk of high-power diode laser array [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 1904-1910. (in Chinese)

[8] Lu Guoguang, Huang Yun, Lei Zhifeng. Lifetime evaluation on high power cm-bars[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2328-2332. (in Chinese)

[9] Wang Wen, Gao Xin, Zhou Zepeng, et al. Steady-state thermal analysis of hundred-watt semiconductor laser with multichip-packaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1438-1443. (in Chinese)

[10] Wang Shuna, Zhang Pu, Nie Zhiqiang, et al. Numerical modeling of the influence of temperature and driving current on "smile" in high power diode laser arrays[C]//Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2015 16th International Conference on IEEE, 2015: 95-101.

[11] Tian Zhenhua, Sun Chenling, Cao Junsheng, et al. Junction temperature measurement of high power diode lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1244-1249. (in Chinese)

[12] Zhang Pu, Wang Jingwei, Hou Dong, et al. A 3 000 W 808 nm QCW G-stack semiconductor laser array[C]//XX International Symposium on High Power Laser Systems and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2015: 92550W-1-7.