

文章编号: 0258-7025(2010)10-2497-05

高光束质量大功率半导体激光阵列的热特性

王智群¹ 尧舜² 崔碧峰¹ 王智勇² 沈光地¹

(¹北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100124)
(²北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 针对目前大功率半导体激光短阵列器件和多个半导体激光单元器件集成结构应用于全光纤结构光纤激光器的发展趋势及其相关热控制理论的缺乏,利用有限元软件 ANSYS 对基于标准传导热沉散热结构的高光束质量半导体激光阵列(LDA)进行热特性仿真计算,通过改变阵列内部发光单元间距、发光单元数,将传统高填充因子厘米阵列(cm-bar)结构过渡到短阵列器件或多单元集成器件热模型,其热特性,为这种具有高光束质量的新型器件的设计及其高性能、长寿命散热提供了理论基础。

关键词 激光器;半导体激光阵列;热阻;高光束质量

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2497

Thermal Characteristic of High Beam Quality Laser Diode Array

Wang Zhiqun¹ Yao Shun² Cui Bifeng¹ Wang Zhiyong² Shen Guangdi¹

(¹Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
(²Institute of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Aiming at the development trend of high-power semiconductor devices and multiple short laser diode array components integrated structure applied to a single all-fiber structure optical fiber lasers and lack of related heat control theory, the finite element software ANSYS is used to simulate the thermal properties of a high beam quality laser diode arrays based on the standard heat conduction heat sink structure. By changing the spacing and the number of light-emitting unit of the light-emitting elements in the array, the traditional structure of high fill factor cm-bar array is transitioned to short- or multi-unit integrated device thermal model. A theoretical basis is provided for the design and high-performance, long life heat of this new high beam quality device by its hot characteristics.

Key words lasers; laser diode array; thermal resistance; high beam quality

1 引 言

大功率光纤激光器以其光束质量高、光功率密度大、转换效率高、体积小、结构紧凑、易于调制、使用简便以及免于维护等显著特点,成为全面提升目前传统激光器性能和掀起激光产业技术改造的先锋和领航者。作为第三代激光技术的代表,随着大功率光纤激光器各项指标的不断提高,目前已逐步替

代固体和气体激光器广泛应用于军事、工业、医疗和空间通信等领域^[1~3]。光纤激光选区融化 316L 不锈钢获得了良好的效果^[4];大功率光纤激光器也应用于传感器领域,开发出高分辨率光纤激光传感系统^[5,6]。近年来高功率全光纤结构光纤激光器抽运源需求的日益增长,更是促进了光纤耦合输出大功率半导体激光器功率的增长,目前已获得了数值孔

收稿日期: 2010-02-03; 收到修改稿日期: 2010-03-22

基金项目: 国家 863 计划(2006AA03A121)资助课题。

作者简介: 王智群(1975—),女,博士研究生,主要从事半导体器件封装技术方面的研究。

E-mail: wangzq@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 沈光地(1939—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子学和超高速微电子学等方面的研究。

E-mail: shenguangdi@bjut.edu.cn

径为 $0.22, 200 \mu\text{m}$ 芯径光纤单模块输出 500 W , 耦合效率 83% , 预计 2011 年可达 1000 W 水平^[7]。2008 年美国 JDSU 公司报道了用于光纤耦合的半导体激光单元器件, 连续输出功率超过 20 W , 利用 $105 \mu\text{m}$ 芯径光纤耦合稳定输出功率大于 10 W , 寿命超过 10^5 h ^[8]。2009 年, 美国 Nlight 公司集成 14 个单元器件获得了数值孔径为 $0.15, 105 \mu\text{m}$ 芯径光纤单模块输出 100 W ^[9]。综合该领域国外各大研究机构发展趋势表明, 多个具有高光束质量的 $100 \mu\text{m}$ 发光单元条宽的单元器件空间集成或低填充因子短阵列器件正逐步取代传统 $150 \sim 200 \mu\text{m}$ 发光单元条宽厘米阵列 (cm-bar) 作为光纤激光器抽运源使用。

另一方面, 由于半导体激光器内部有源区的热管理水平直接影响器件性能和寿命^[10], 因此大功率半导体激光器内部结构变化引起的热特性变化研究是支撑其高性能工作的关键^[11]。相对于传统高功率 cm-bar, 高光束质量短阵列器件或多个单元器件集成结构所形成的阵列结构中热源间距更大、单个热源内部热流密度更高, 导致其稳态热特性与传统 cm-bar 相比有较大差距。而目前现有大功率半导体激光器热特性研究主要集中在 cm-bar 结构和单个单元器件, 对于此类短阵列器件和多个单元器件集成结构热特性研究尚未见文献报道。鉴于此, 本文利用有限元软件 ANSYS 进行热特性仿真计算, 通过改变阵列内部发光单元间距、发光单元数, 将传统高填充因子 cm-bar 结构过渡到短阵列器件或多个单元器件集成热模型, 进而获得其热特性差别。

2 有限元计算模型及网格划分

作为光纤激光器抽运源的高光束质量半导体激光器为获得较长工作寿命广泛采用传导热沉作为激光阵列的热连接单元, 该结构避免了有源热沉被冷却液侵蚀而造成的寿命降低问题^[12]。如图 1 所示, 基于标准传导热沉半导体激光器结构中激光阵列 P 面朝下通过高导热焊料与传导热沉连接, 传导热沉底部通过高导热界面填充材料与水冷热沉 (water cooling) 或热电制冷片 (TEC) 相连接。激光器工作时, 激光阵列有源区内部产生热量通过 P 面电极经焊料层进入传导热沉内部, 最终通过固体中的热传导进入水冷热沉或热电制冷片底部, 通过冷却介质耗散到自然界中。计算中, 由于负极片与阵列 N 面采用金丝或铜箔连接不参与散热, 仅对传导热沉底

座进行实体建模。另一方面, 由于激光阵列有源区到传导热沉表面距离仅为微米量级, 热流进入热沉的“窗口”大小可近似认为与激光 bar 中发光单元大小相同。计算模型中根据半导体激光阵列 (LDA) 或单元器件的发光单元条宽、间隔等参数, 将半导体激光阵列简化为不同尺寸、个数、间距的矩形面热源阵列加载到实体模型表面相应位置。由于标准传导热沉采用无氧铜材料制作热导率高且厚度较大 (7.5 mm), 结合高效水冷热沉或热电制冷装置可以较为准确地控制传导热沉底面温度, 因此在传导热沉底面施加恒温边界条件 $T=20 \text{ K}$ 。由于焊料层和连接层均采用高导热材料且厚度较小, 对整个系统热阻贡献不大, 因而可忽略; 同时, 忽略对流传热和热辐射, 在计算模型其他表面均施加绝热边界条件^[13,14]。

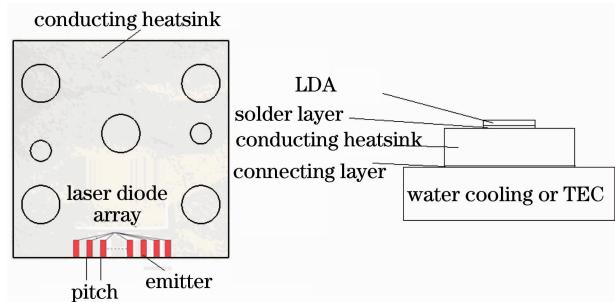


图 1 传导热沉半导体激光阵列模块示意图

Fig. 1 Laser diode array based on conducting heatsink

计算中, 利用 Solid90 单元对实体模型进行网格划分, 通过不断增加网格单元个数提高计算精度。图 2 为利用该计算模型计算 $100 \mu\text{m}$ 条宽, $500 \mu\text{m}$ 间距标准 60 W 半导体激光阵列热沉表面最高温升计算结果与划分单元个数变化曲线。由图 2 可以看出随着网格单元个数的增加, 热沉表面最高温升逐渐收敛于一定值, 当单元数由 62500 个继续增加到 125000 个时, 计算结果变化小于 0.5% , 结果精度满足工程应用需求。所有计算均按此网格划分进行,

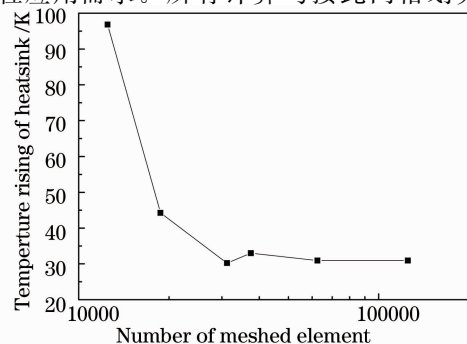


图 2 计算结果与网格划分单元数变化关系

Fig. 2 Results on different element numbers

如图 3 所示,网格主要集中在激光阵列下方热沉等温度梯度较大部分。

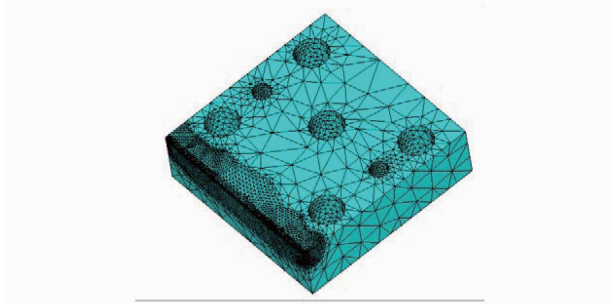


图 3 计算模型网格划分图
Fig. 3 Meshed module

3 计算结果及分析

图 4 为计算得到发光单元条宽 $100\ \mu\text{m}$, 单个发光单元发热量为 $3.16\ \text{W}$, 发光单元周期为 $500\ \mu\text{m}$, 横向尺寸 $1\ \text{cm}$ 的标准 cm-bar 工作时热沉上表面温度分布。由图 4 可见,在底部散热良好的情况下,热沉温升主要集中在半导体激光阵列下方附近,最高温升处为热沉上表面半导体激光阵列前腔面附近处,该处温度变化直接关系到半导体激光器实际工作寿命,因而以此处最高温升计算热阻表征结构散热性能。

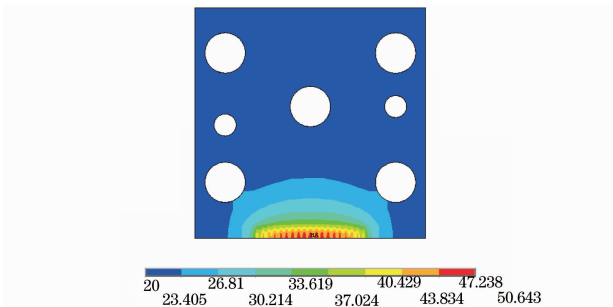


图 4 传导热沉上的表面温度分布
Fig. 4 Temperature profile of heatsink's top surface

图 5 为保持阵列内部发光单元尺寸及发热量不变,仅改变 $1\ \text{cm}$ 阵列内部发光单元个数进而增加发光单元间距时,计算得到的半导体激光阵列工作时前腔面下热沉表面温升的横向分布曲线。由图 5 可见,半导体激光阵列工作时,前腔面附近热沉表面温度横向变化周期与阵列内部横向结构周期一致,每一个局部极大值对应一个发光单元位置;随着阵列内部发光单元的减少,前腔面处热沉对应温升相应降低,这是由器件整体发热量减少引起的;同时,各发光单元温升差异逐渐减小。图 5 表明,阵列器件中发光单元尺寸相同情况下,阵列器件中发光单元

个数及发光单元间距的不同不仅影响器件的整体散热情况,同时还会导致发光单元之间的局部散热差异。

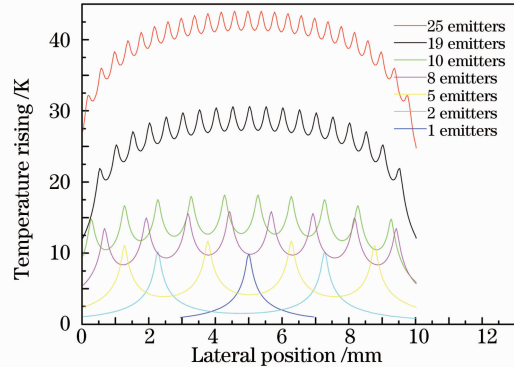


图 5 不同 LDA 工作时的横向温升分布
Fig. 5 Temperature rising of different LDA

图 6 为图 5 计算结果中热沉表面最高温升、阵列内部发光单元间最大温差以及热阻随阵列内部发光单元数增加的变化趋势。由图 6 可以看出, $1\ \text{cm}$ 阵列内部包含 19 个发光单元时,热沉表面最高温升为 $31\ \text{K}$, 而当其发光单元数下降到 1 个时,其整体发热量仅为前者的 $1/19$, 而其表面最高温升约为 $9.9\ \text{K}$, 仅下降 $2/3$ 。这一结果表明当阵列尺寸相同条件下,减少阵列内部发光单元数尽管可以线性降低器件内部散热量,但并不能控制热沉表面最高温升线性降低。器件热阻随发光单元数减少最初缓慢增加,随着发光单元数的进一步减小其斜率逐渐增大,这主要是由于热源的相对集中,散热面积减小,进而导致散热效率的下降,热阻增大,导致整体温升下降比例低于散热量下降比例。另一方面,随着阵列内部发光单元个数的减少,导致阵列中部发光单元与端部发光单元温差逐渐降低。以 25 个发光单元阵列为例,其最大温差达 $9\ \text{K}$ 左右。降低了阵列器件整体寿命,而当阵列内部发光单元减少为 4 个

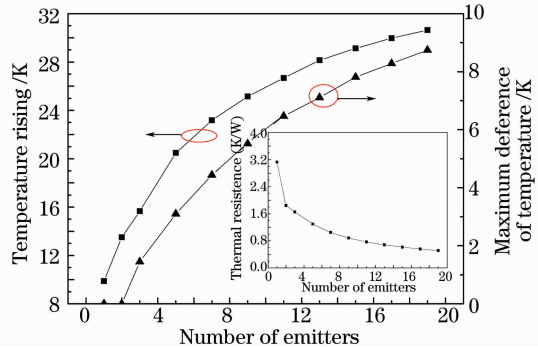


图 6 阵列热特性与发光单元个数的关系曲线
Fig. 6 Thermal characteristics of diode laser array at different emitter numbers

时,各发光单元之间温差基本为零。这主要是由于发光单元数下降、间距增大导致各发光单元之间热相互作用降低,每个发光单元的温升仅由自身散热条件决定而与所处阵列中的空间位置无关。综合图 5,6结果可见,阵列器件与单元器件最大差别在于各发光单元温度场的相互叠加,这种叠加在提高整个器件平均温度的同时,导致阵列中心发光单元与端部发光单元的温度差的出现;另一方面,器件的温升可以通过减少阵列内部发光单元个数加以降低和控制,但这是以降低散热效率、增大热阻为代价的。

为了进一步量化发光单元之间的热相互作用,在计算中固定阵列内部发热量及发光单元个数,对不同发光单元间距尺寸下的热沉表面温度场进行比较。图 7 为计算得到发光单元条宽 $100\ \mu\text{m}$,单个发光单元发热量为 $3.16\ \text{W}$,阵列内部包含 3 个发光单元,发光单元之间间隔不同时,器件前腔面附近的温度分布曲线。与图 5 曲线类似,图 7 为一系列具有 3 个局部极大值的曲线构成。图 7 表明,在发光单元数量、条宽和发热量均相同的情况下,随着发光单元间距的增大,器件腔面附近温升逐渐减小,不同发光单元之间温度差也随之减小。图 8 为器件热阻随发光单元间距的变化曲线,随着发光单元间距的增加热阻快速下降并趋于饱和。当发光单元间距为无穷大时则发光单元之间相互影响为零,此时最高温升值应等于图 5 中单个发光单元温升值 $9.9\ \text{K}$,该值对应热阻值 $1.04\ \text{K/W}$ 即为图 8 曲线的收敛极限。由图 8 可以看出,通过增加发光单元间距的方法可有效降低器件热阻,但是随着间距的增大效果逐渐减小,此时从提高器件亮度与控制有源区温度两方面考虑,存在一个优化尺寸即图 8 曲线中的折

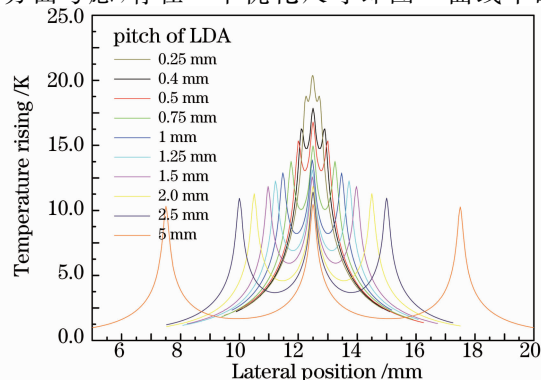


图 7 不同间距 3 个发光单元阵列温升分布图

Fig. 7 Temperature rising of three emitter arrays at different pitches

转区,而当发光单元间距大于 $1.5\ \text{mm}$ 之后,继续增大间距尺寸,热阻减小效果不明显。

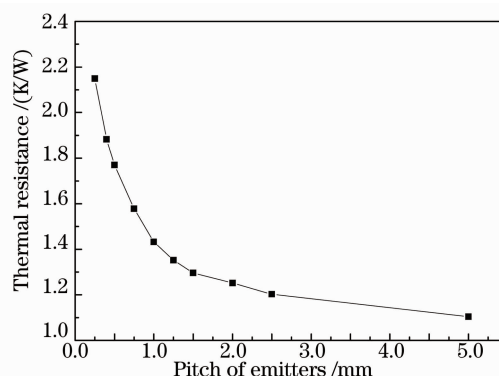


图 8 3 个发光单元阵列热阻随间距的变化曲线

Fig. 8 Thermal resistance of three emitter arrays at different pitches

4 结 论

利用有限元软件 ANSYS 对基于标准传导热沉的半导体激光阵列进行建模,通过改变阵列内部发光单元个数及间距,将热模型从标准 cm-bar 过渡到具有高光束质量的短阵列器件和多单元器件集成结构热模型,获得该类器件其自身结构变化对其工作时稳态热特性的影响以及与传统 cm-bar 稳态热特性的区别。数值计算结果表明,多个发光单元之间的热相互作用是影响其最终温度场分布的决定因素,相同输出功率情况下减少阵列内部发光单元个数会增大热阻,降低阵列内部发光单元之间的温度差。增大发光单元间距可有效降低阵列器件热阻,但随着间距的进一步增大,其效果趋于饱和。

参 考 文 献

- Valentin Gapontsev, William Krupke. Fiber lasers grow in power [J]. *Laser Focus World*, 2002, **8**: 83~89
- V. P. Gapontsev, N. S. Platonov, O. Shkurihin *et al.*. 400 W low-noise single-mode cw ytterbium fiber laser with an integrated fiber delivery[C]. CLEO, Baltimore, 2003. CThPDB9
- A. Galvanauskas. High power fiber lasers[J]. *Opt. Photon. News*, 2004, **15**(7): 42~47
- Wang Di, Yang Yongqiang, Wu Weihui. Process optimization for 316L stainless steel by laser selective melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3233~3239
王迪, 杨永强, 吴伟辉. 光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3233~3239
- Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 569~572
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 569~572
- Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber

- laser sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91
- 肖浩, 李芳, 王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 87~91
- 7 Matthias Haag, Bernd Kler, Jens Biesenbach *et al.*. Novel high-brightness fiber coupled diode laser device[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560T
- 8 Prasad Yalamanchili, Victor Rossin, Jay Skidmore. High-power, high-efficiency fiber-coupled multimode laser-diode pump module (9XX nm) with high-reliability[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687612
- 9 Scott R. Karlsen, R. Kirk Price, Mitch Reynolds *et al.*. 100-W, 105- μm , NA0.15 fiber coupled laser diode module [C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 71980T
- 10 P. Unger. Introduction to Power Diode Lasers [M]. Berlin: Springer, 2000
- 11 Michael Leers, Konstantin Boucke, Christian Scholz *et al.*. Next generation of cooling approaches for diode laser bars[C]. *SPIE*, 2006, **6456**: 64561A
- 12 Thomas Löffler, Andreas Meyer, Karsten Schmidt *et al.*. Lifetime testing of laser diode coolers [C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64561F
- 13 Michael Leers, Konstantin Boucke, Manfred Götz. Thermal resistance in dependence of diode laser packages [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687609
- 14 E. C. Yu, A. J. Przekwas. Thermomechanical design of a microchannel cooled semiconductor laser diode array package[C]. *SPIE*, 1999, **3625**: 535~542