

文章编号: 1000-7032(2014)12-1474-06

## 高功率半导体巴条激光器的热特性分析

李 江\*, 李 超, 徐 昊, 章 强, 周旻超

(中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 半导体光电子技术研究室, 江苏 苏州 215163)

**摘要:** 对采用5层叠焊的微通道无氧铜热沉冷却的巴条激光器进行了流体动力学(CFD)分析。建立了条宽10 mm、腔长1.5 mm巴条芯片的流固耦合共轭传热模型,得到了不同流量水冷下激光器的热阻和压力损失曲线。分析了300 mL/min水流时,激光器的温度分布和冷却水的流动性能。实验条件下,测试了该微通道热沉封装的808 nm巴条激光器的热阻和压力损失。数值计算和实验测试所得的结果一致,在300 mL/min水流下,巴条热阻为0.38 °C/W,在温度不高于70 °C时可满足连续模式下90 W的散热要求。

**关键词:** 半导体激光器; 计算流体动力学; 微通道热沉; 热阻

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20143512.1474

## Thermal Analysis of High Power Semiconductor Laser Bar

LI Jiang\*, LI Chao, XU Hao, ZHANG Qiang, ZHOU Min-chao

(Laboratory of Semiconductor Optoelectronic Technology, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

\* Corresponding Author, E-mail: lij@sibet.ac.cn

**Abstract:** Computational fluid dynamics (CFD) simulation and experimental analysis are presented for a semiconductor laser bar, which is cooled by a 5-layer oxygen-free copper micro-channel heat sink. A fluid-solid coupling conjugate heat transfer model is built for the micro-channel cooler and 10 mm-wide, 1.5 mm-cavities long bar. The curves of thermal resistance and pressure drop to flowing rate are plotted. The temperature of the laser bar and the characteristic of the cooling water are studied at 300 mL/min flowing rate. An experimental testing is performed for the thermal resistance and pressure drop of an 808 nm laser, which is packaged with the micro-channel cooler. The simulation results consistent with experiment. In the flowing rate of 300 mL/min, the thermal resistance is 0.38 °C/W, which can dissipate a continuous 90 W heat below 70 °C.

**Key words:** semiconductor laser; CFD; micro-channel cooler; thermal resistance

### 1 引 言

半导体激光器具有体积小、效率高、寿命长、稳定可靠、使用成本低等优点,被广泛应用于国防(激光雷达、激光引信、激光制导和跟踪等)和国民经济(光通信、激光治疗、激光加工等)各领域,

已在激光行业中占据了不可替代的重要地位<sup>[1]</sup>。近年来,随着半导体激光器功率的不断增大,其工作过程中产生的大量废热已严重制约半导体激光器性能的进一步提高。半导体激光器的输出特性与其有源区的工作温度(结温)密切相关,随着结温的升高,会产生激光器效率下降、阈值电流增

大、波长红移、内部缺陷增加等一系列问题,严重影响激光器的寿命<sup>[2]</sup>。目前,国内外广泛使用的无氧铜微通道热沉具有热阻小、制备工艺简单、成本低、适用于模块化阵列等优点,已成为半导体巴条激光器(将巴条芯片和无氧铜热沉封装在一起)高效散热技术的标准配置。国内外一些文献对微通道热沉冷却的巴条激光器热特性进行了分析<sup>[3-6]</sup>。这些报道主要集中在对微通道的特征尺寸和热沉的结构进行优化上,对巴条激光器的温度场特性尚缺乏深入的分析。本文采用 CFD 数值模拟和物理实验的方法分析了 808 nm 微通道热沉冷却的巴条激光器热特性,对进一步改进微通道巴条激光器的热性能具有重要的参考意义。

## 2 数值模拟和结果

### 2.1 热沉的数值模型

微通道内冷却水的流动视作三维稳态不可压缩粘性湍流,冷却水和热沉之间的对流换热可表示为通用的控制方程形式:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\Phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\Phi) + S_{\phi}, \quad (1)$$

式中: $\Phi$  为通用变量; $\rho$  和  $\mathbf{U}$  分别表示材料密度和速度矢量; $\Gamma_{\phi}$  和  $S_{\phi}$  分别为广义扩散系数及广义源项,二者取不同表达式时,可将式(1)分别推导为连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程和湍流模型输运方程<sup>[7]</sup>。

图 1 所示为巴条激光器的结构模型。微通道热沉采用 5 层无氧铜薄片叠焊而成。巴条芯片条宽为 10 mm,腔长为 1.5 mm。热沉内部 10 个微通道的特征尺寸为宽 0.35 mm、高 0.25 mm。为

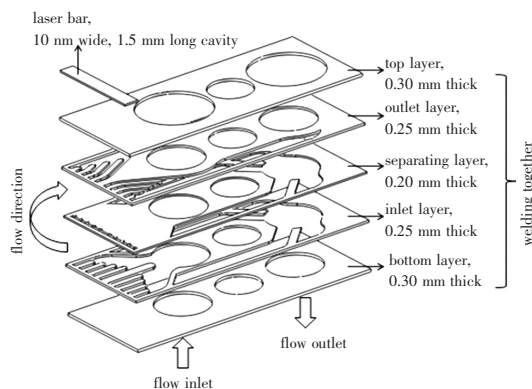


图 1 巴条激光器的结构

Fig. 1 Structure of the laser bar

了减小阻力,回水层微通道向两边伸出。两端微通道长度短,中间微通道长度长,这样对巴条中间散热更充分,减小条宽方向温度差异。去离子冷却水温度设定为 20 °C,流量设定为 100 ~ 700 mL/min,出口设定为参考压力。巴条芯片 P 面朝下封焊在微通道热沉上。巴条激光器工作时,冷却水由热沉的底层通过入水层进入微通道,通过隔离层前端巴条正下方的通道,进入回水层,再到出口。微通道内冷却水和无氧铜之间有很大的换热效率,可以将巴条激光器的大量废热带走。

本文研究的巴条芯片填充因子大于 70%,发光单元大于 60 个,连续模式下功率为 90 W,光电转换效率约为 50%。巴条芯片整体作为发热源,设定其发热功率为 90 W。只考虑冷却水对巴条激光器的对流换热,忽略空气对巴条激光器的对流换热。湍流模型采用  $k-\varepsilon$  模型。巴条芯片材料 GaAs 导热系数 44 W/(m·K),无氧铜导热系数为 380 W/(m·K)。

模拟计算主要分 3 步,分别建立固体和液体模型,利用第三方软件对模型进行网格划分,设定边界条件用软件进行模拟计算。

利用网格工具进行网格划分时,既要控制网格数量,避免计算规模过大,又要保证计算精度。如此,本文在划分网格的时候,将微通道处网格尺度调为 0.05 mm,其余地方网格尺度为 0.15 mm。网格模型中所有网格为四面体,总体网格数为 100 万。图 2 是划分后的网格模型,因为结构对称,所以只取一半做网格划分。

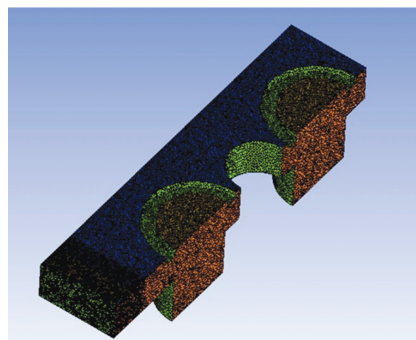


图 2 网格模型

Fig. 2 Mesh model

模拟计算的边界条件如下:高功率半导体激光器芯片与热沉焊接的热界面尺寸是 10 mm × 1.5 mm,设计参数为产热量 90 W。本文中将热源作为平均热源来处理,因此芯片与热沉表面的

平均热流密度是  $6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 。入口流量分别设定为 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 mL/min, 水温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。出口条件为 1 个标准大气压  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

## 2.2 热阻和压力损失分析

微通道热沉冷却的半导体巴条激光器热阻定义为<sup>[8]</sup>:

$$R_{th}(Q_f) = \frac{T - T_0}{Q}, \quad (2)$$

式中:  $R_{th}(Q_f)$  表示冷却水流量为  $Q_f$  时的热阻;  $T$  为巴条有源区的最高温度;  $T_0$  为冷却水入口处温度, 巴条工作时由制冷机供应  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  的去离子水;  $Q$  为有源区的发热功率, 设定为  $90 \text{ W}$ 。

实际液体是有黏性的, 为了克服黏性摩擦力, 液体流动时要损耗一部分能量。由于管道中流量不变, 因此这种能量损耗表现为压力损失。压力损失产生的内因是液体本身的黏性, 外因是管道结构。液体在管道中流动时产生的压力损失分为两种: 一种是液体在等径直管中流动时因黏性摩擦而产生的压力损失, 称为沿程压力损失; 另一种是由于管道的截面突然变化、液流方向改变或其他形式的液流阻力(如控制阀阀口)而引起的压力损失, 称为局部压力损失<sup>[9]</sup>。

微通道热沉通以不同流量冷却水时, 热阻、流量和压力损失三者有密切关系。表 1 给出了数值模拟的不同流量下巴条热阻和压力损失的结果, 图 3 所示为相应的拟合曲线。由图中可以看出, 增加冷却水的流量能够降低巴条激光器的热阻, 但相应的压力损失也增高, 且随着流量的增加, 热阻下降效率降低, 压力损失则显著提高。实际过

表 1 热阻和压力损失的仿真结果

Table 1 Simulation results of thermal resistance and pressure drop

Flowing rate/ (mL · min <sup>-1</sup> )	Thermal resistance/ ( $^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ )	Pressure drop/ ( $10^5 \text{ Pa}$ )
100	0.606	0.28
200	0.527	0.53
300	0.474	0.86
400	0.435	1.30
500	0.401	1.80
600	0.383	2.39
700	0.364	3.11

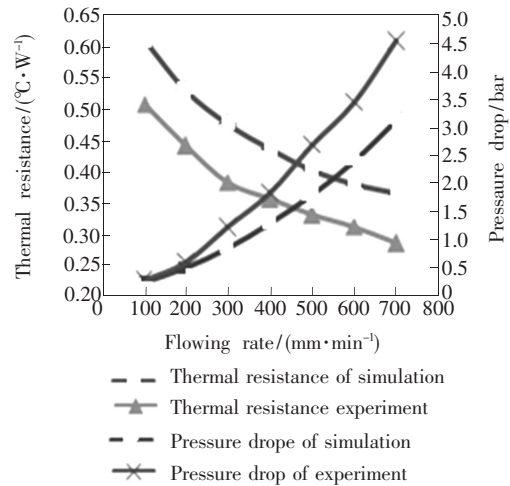


图 3 热阻和压力损失数值仿真和实验测试曲线

Fig. 3 Simulation and experiment results of thermal resistance and pressure drop

程中, 受限于热沉制备工艺和使用工艺条件, 巴条激光器通常通以  $200 \sim 300 \text{ mL/min}$  冷却水; 封装为叠阵时, 则平均每只巴条激光器通以  $150 \sim 200 \text{ mL/min}$  冷却水。

## 2.3 巴条激光器温度分布和冷却水流动特性

不同流量下巴条的温度分布和微通道内水的流动具有相似的场分布特性, 本文选取巴条激光器测试流量  $300 \text{ mL/min}$  进行研究。图 4 所示为

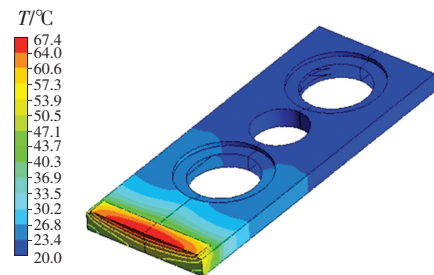


图 4 冷却水流量为  $300 \text{ mL/min}$  时的激光器的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the laser bar at flowing rate of  $300 \text{ mL/min}$

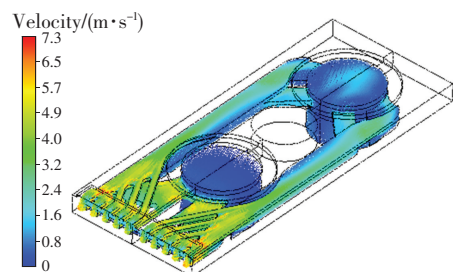


图 5 冷却水流量为  $300 \text{ mL/min}$  时的冷却水流速

Fig. 5 Velocity of the cooling water in micro-channel heat sink at flowing rate of  $300 \text{ mL/min}$

该流量下巴条激光器的温度分布。整个激光器温度最高处集中在巴条芯片有源区发光腔面中心, 其值为 67.4 °C。巴条芯片沿条宽方向呈现两端温度低、中间温度高的分布; 沿垂直条宽远离巴条芯片方向温度则迅速下降, 出水口处温度接近供水温度。

图 5 所示为冷却水流量为 300 mL/min 时在微通道内的流速。可以看出, 冷却水经过微通道时因阻力变大, 压力损失迅速增大, 流速激增。在巴条条宽方向, 两端微通道内的流速比中间微通道流速要大。

### 2.4 巴条激光器条宽方向和垂直条宽方向温度曲线

图 6 和图 7 给出了不同流量下巴条激光器的温度变化曲线。如前所述, 条宽方向的发光腔面表现为中间温度高、两边温度低; 在与条宽垂直的方向, 巴条芯片 1.5 mm 腔长范围内的温度下降为 3 ~ 5 °C。沿条宽方向的温度不均匀性容易导致巴条激光器光谱展宽, 热应力会使“Smile”效应加剧<sup>[10]</sup>。

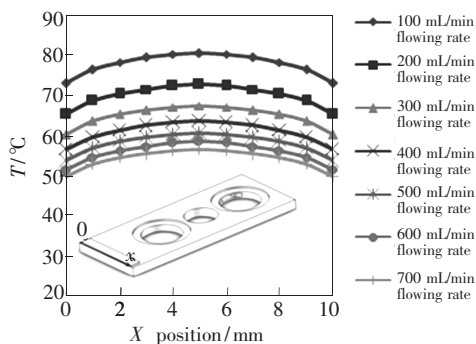


图 6 发光腔面条宽方向的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution parallel to the width direction of the light emitting cavity surface

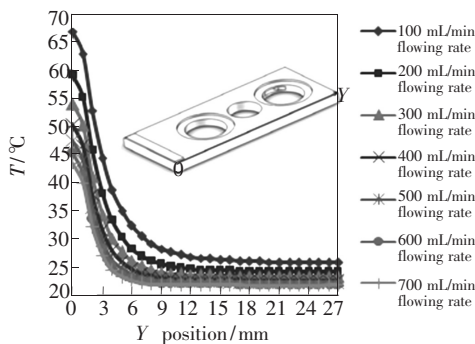


图 7 垂直于条宽方向的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution vertical to the width direction of the light emitting cavity surface

图 8 是巴条激光器通过光栅分光原理将巴条激光器中的每一个发光单元的一级光谱成像在 CCD 上, 横轴表示每个发光点的物理分布, 纵轴表示发光点的相对波长 (nm)。可以看出由于散热不好, 中间发光点的波长比两边大。

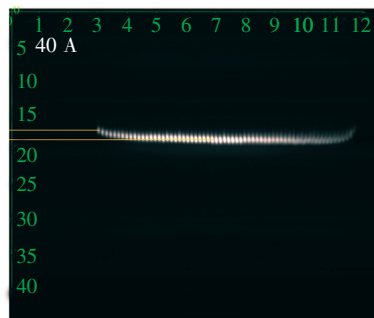


图 8 一级光谱的图像

Fig. 8 Spectrum map of first order

图 9 给出了不同流量下巴条激光器的温度差异的曲线。从图中可以看出, 在不同的冷却水流量下, 巴条激光器条宽方向的发光腔面温度差异在 6.83 ~ 7.64 °C 之间, 温差数值随流量呈线性降低, 该变化趋势约为 0.135 °C/(100 mL/min)。

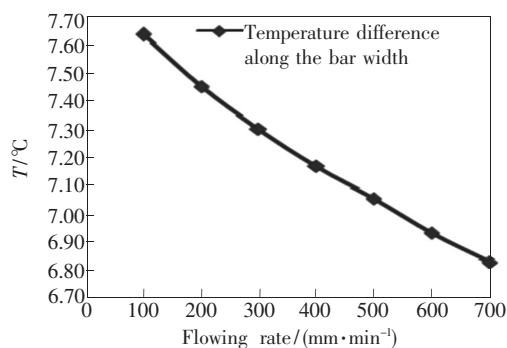


图 9 不同冷却水流量下巴条条宽方向上的温度差

Fig. 9 Laser bar temperature difference along the bar width at different flowing rate

## 3 实验测试和结果

### 3.1 测量方法

采用实验测试的方法对直接影响巴条激光器使用性的热阻和压力损失进行分析。根据式 (2), 对于变量  $T$ , 可利用半导体激光器波长红移和温度升高的对应线性关系来测得, 其关系为:

$$a = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{T_{i+1} - T_i}, \quad (3)$$

式中:  $T_i$  和  $\lambda_i$  为对应的巴条芯片有源区最高温度

和波长; $\alpha$  为半导体激光器温漂系数,对于 808 nm GaAs 半导体激光器,其取值为  $0.28 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

$Q$  为激光器的发热功率,可通过下面的公式计算:

$$Q = UI - P, \quad (4)$$

式中: $U$ 、 $I$  分别为巴条的电压和电流, $P$  为巴条激光器的发光功率。

根据式(2)、(3)、(4)可得

$$R_{th}(Q_i) = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{\alpha [(U_{i+1}I_{i+1} - P_{i+1}) - (U_iI_i - P_i)]}, \quad (5)$$

热阻即为引入  $\alpha$  的波长和巴条激光器发热功率关系曲线的斜率。

图 10 所示为实验测试台的示意图。激光驱动电源受计算机控制,提供巴条激光器工作时所需的电流,计算机记录电流和电压信号。制冷机提供去离子水,水路中安装的压力传感器和流量传感器分别采集压力和流量信号。功率计和光谱仪采集激光的光功率和波长信号。

利用该激光器测试台测得的巴条激光器光功率-电流-电压( $L-I-V$ )曲线和光谱(测试条件为电流 90 A,水流 250 mL/min)分别如图 11 和图 12 所示。

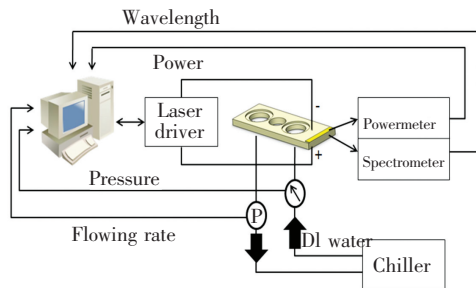


图 10 实验测试台示意图  
Fig. 10 Diagram of the experiment testing system

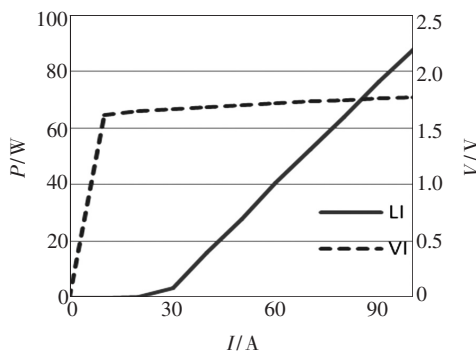


图 11 实验测得的巴条激光器的光功率-电流-电压曲线  
Fig. 11  $L-I-V$  curve of the bar laser tested by the experiment testing system

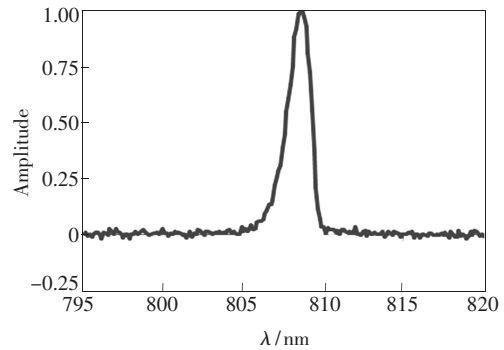


图 12 实验测得的巴条激光器的光谱  
Fig. 12 Spectrum of the bar laser tested by the experiment testing system

测试台还具有二级光谱图像的采集模块。通过采集一级光谱图像,可以分析巴条激光器中间发光点和两边发光点之间的波长漂移,如图 8 所示。

### 3.2 测试结果

表 2 给出了实验测得的 100 ~ 700 mL/min 冷却水流量下的热阻和压力损失。多纵模可能会因为驱动电流或冷却条件变化发生光谱畸变,此时波长的变化就不仅是由温度引起了。在实验测试中,驱动电流和水流量变化并未引起光谱畸变,因此可以用波长的漂移来推算温度的变化。为了便于比较,我们将二者拟合曲线放置在图 2 中。对比数值仿真结果和实验测试结果,发现二者具有相同的变化趋势。实验测试的热阻比数值计算结果小  $0.10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。造成该误差的主要原因是:微通道热沉内部微通道特征尺寸为百微米级,相对常规尺寸而言,其流动雷诺数更小,湍流效应更大,流动阻力更大,换热更充分。目前对微尺度换热的研究还不成熟,本文采用常规计算流体动力

表 2 热阻和压力损失的实验结果

Table 2 Experimental results of thermal resistance and pressure drop

Flowing rate/ ( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Thermal resistance/ ( $^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ )	Pressure drop/ ( $10^5 \text{ Pa}$ )
100	0.506	0.31
200	0.440	0.61
300	0.382	1.23
400	0.355	1.84
500	0.330	2.68
600	0.311	3.44
700	0.285	4.51

学的理论进行研究, 换热效率较真实物理模型更小<sup>[1]</sup>, 因此热阻计算结果比实验测试结果偏大。

此外, 我们还利用测试台测试了巴条激光器的冷波长。在占空比为 1% 的脉冲电流条件下 (此时巴条发热可以忽略) 测量巴条激光器的波长, 再在连续模式 90 W 散热条件下测量巴条激光器的波长, 两者的波长差小于 11 nm。按照波长温度系数 0.28 nm/°C 来推算, 在 90 W 散热条件下, 巴条芯片结温比环境温度上升不大于 40 °C。

## 4 结 论

利用数值计算和实验测试的方法分析了微通道冷却的巴条激光器的热特性, 并对结果误

差进行了定性分析。随着冷却水流量的增加, 巴条激光器热阻变小, 压力损失变大。流量增大后, 热阻下降趋势降低, 压力损失则显著提高。在巴条激光器发光腔面有源区的条宽方向上, 温度分布表现为中间高、两边低, 温度差值为 6.83 ~ 7.64 °C, 与模拟计算相差 1 ~ 2 °C, 该温度差值随流量表现为 1.35 °C/L 的线性降低变化。在 300 mL/min 的冷却水流量下, 巴条激光器热阻的数值计算结果和实验测试结果分别为 0.474 °C/W 和 0.382 °C/W。可以推断, 巴条在连续模式下工作在 90 W 散热条件时, 温度不会超过 70 °C, 这与根据冷波长测量的结果进行的推算是相吻合的。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Wang D, Li X Q. Latest developmentst and application status of diode lasers [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2001, 9(3):279-283 (in Chinese).
- [ 2 ] Tian Z H, Sun C L, Cao J S, *et al.* Junction temperature measurement of high power diode lasers [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(6):1244-1249 (in Chinese).
- [ 3 ] Kreutz E W, Pirch N, Ebert T, *et al.* Simulation of micro-channel heat sinks for optoelectronic microsystems [J]. *Microelectron. J.*, 2000, 31(9):787-790.
- [ 4 ] Yu E C, Prekwas A J. Thermomechanical design of a microchannel cooled semiconductor laser diode array package [J]. *SPIE*, 1999, 3625:535-542.
- [ 5 ] Yao S, Ding P, Liu J, *et al.* Microchannel heat sink of high beam quality semiconductor laser array [J]. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2009, 36(9):2286-2289 (in Chinese).
- [ 6 ] Hu L M, Li Z J, Qin L, *et al.* Thermal analysis of high-power, high-duty-cycle laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2010, 30(4):1055-1060 (in Chinese).
- [ 7 ] Tao W Q. *Numerical Heat Transfer* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001:1-14 (in Chinese).
- [ 8 ] Joyce W B, Dixon R W. Thermal resistance of heterostructure lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, 46(2):855-862.
- [ 9 ] Wang S C, Rong Y M. *Hydraulic Transmission* [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2006, 8:37-37 (in Chinese).
- [ 10 ] Xu H W, Ren Y X, An Z F, *et al.* Packaging of 808 nm 1 500 W continuous wave operation perpendicularity laser diode stack [J]. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2010, 37(11):2286-2289 (in Chinese).
- [ 11 ] Guo Z Y. Frontier of heat transfer-microscale heat transfer [J]. *Adv. Mechan.* (力学进展), 2000, 30(1):1-6 (in Chinese).



李江(1963 -), 男, 江苏苏州人, 研究员, 1995 年于南开大学获得博士学位, 主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: lij@sibet.ac.cn