

# 电注入椭圆微腔半导体激光器热特性分析

陆 日<sup>1,2</sup> 许留洋<sup>1</sup> 高 欣<sup>1</sup> 黄永箴<sup>2</sup> 肖金龙<sup>2</sup> 薄报学<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083

**摘要** 对长轴为12 μm、短轴为10 μm并在长轴处直连2 μm宽输出波导的椭圆微腔激光器的热特性进行了实验和理论分析。测量连续电流注入微腔激光器的稳态特性,根据其波长红移计算器件热阻为 $Z_T=0.846$  K/mW。用有限元分析法计算椭圆微腔的热阻,理论与实验结果相吻合,热阻的最大偏差为5%。研究了微腔激光器衬底厚度对微腔有源区温度的影响,通过引入侧向散热机制有效改善了微腔激光器的热特性。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 微腔; 热阻; 有限元分析

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0402007

## Thermal Characterization of Electrically Injected Elliptical Microcavity Lasers

Lu Ri<sup>1,2</sup> Xu Liuyang<sup>1</sup> Gao Xin<sup>1</sup> Huang Yongzhen<sup>2</sup> Xiao Jinlong<sup>2</sup> Bo Baoxue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** The thermal behaviors of the elliptical microcavity laser are analyzed experimentally and theoretically. The major axis of the elliptical microdisk is 12 μm, the minor axis is 10 μm, and the output waveguide with width of 2 μm is connected directly. The thermal characteristics are investigated based on the lasing characteristics for continuous-wave electrical injection operations. The mode wavelength shift is used to estimate the temperature impedance ( $Z_T=0.846$  K/mW) during continuous operation. Based on the finite-element modeling, the thermal impedance is simulated for the elliptical microcavity laser and the simulation results are in good agreement with the experimental data. The maximum temperature impedance deviation between the simulated and experimental results is about 5%. The temperature rise in the active region as a function of the substrate size is investigated. The simulated results indicate that the heating performance of the benzocyclobutene-confined elliptical microcavity laser can be greatly improved by using an interlayer thermal shunt.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; microcavity; temperature impedance; finite element analysis

**OCIS codes** 140.5960; 140.3945; 140.6810

## 1 引 言

半导体微腔激光器是光电子学和光子学领域中迅速发展起来的一种新器件,体积小、品质因子高,有利于

收稿日期: 2015-12-08; 收到修改稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61176048,61177019,61308051)、吉林省科技发展计划(20150203007GX, 20130206016GX)、中国工程物理研究院高能激光重点实验室基金(2014HEL01)

作者简介: 陆 日(1988—),男,硕士研究生,主要从事半导体微腔激光器模式特性及热特性等方面的研究。

E-mail: luri@semi.ac.cn

导师简介: 薄报学(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事半导体激光器等方面的研究。

E-mail: bbx@cust.edu.cn(通信联系人)

在极低阈值下工作,并具有极高的调制速率,是光电子集成芯片的理想光源<sup>[1-5]</sup>。随着微腔激光器的不断发展,激光器内部热效应对器件性能的影响越来越明显,成为限制激光器工作特性的关键因素<sup>[6-7]</sup>。当激光器外部注入连续电流时,由于内部热积累严重,使器件有源区温度升高,导致器件的光波长红移、阈值电流增大、转换效率降低、输出功率降低以及寿命缩短等<sup>[8-10]</sup>。半导体微腔激光器温度特性及其对器件性能的影响引起了广泛的关注<sup>[11]</sup>。用理论分析估计微腔激光器产热效应引起的器件温度变化常见诸报道,研究主要针对垂直腔以及硅绝缘衬底键合的微腔激光器的热效应<sup>[12-15]</sup>,对侧向限制的边发射微腔激光器热特性研究较少。

本文研究了长轴为 12  $\mu\text{m}$ 、短轴为 10  $\mu\text{m}$  并在长轴处直连 2  $\mu\text{m}$  输出波导的椭圆微盘激光器的热特性,分析了工作温度对其静态特性的影响,并用有限元分析进行模拟仿真。采用热电耦合方法计算了三维微腔激光器在不同注入电流下的有源区温升,分析了衬底尺寸对有源区温升的影响及侧向温度扩散机制。

## 2 椭圆微腔激光器的温度特性

### 2.1 微腔激光器静态特性

椭圆微腔激光器的示意图和截面图如图 1 所示,长轴处连接宽为 2  $\mu\text{m}$  的输出波导,长轴  $a=12 \mu\text{m}$ ,短轴  $b=10 \mu\text{m}$ ,BCB 为苯并环丁烯。微腔激光器置于半导体制冷器(TEC)控制的样品台上进行控温,通过多模光纤耦合测得激光器的输出功率。

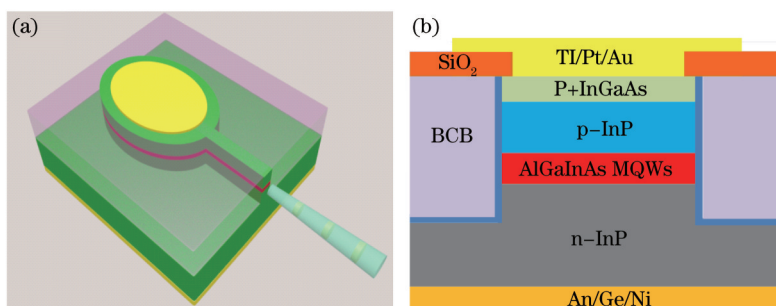


图 1 直连波导椭圆微腔激光器。(a) 设备示意图;(b) 截面示意图

Fig.1 Waveguide elliptical microcavity laser. (a) Schematic of the equipment; (b) cross-sectional schematic diagram

图 2(a)所示为椭圆腔激光器在 TEC 温度为 288、294、300 K 时的功率-电流曲线,激光器的长轴为 12  $\mu\text{m}$ ,短轴为 10  $\mu\text{m}$ ,阈值电流分别为 6、7、9 mA,最大输出功率分别为 41、35、30  $\mu\text{W}$ ,注入电流较大时均出现功率饱和现象。图 2(b)所示为温度为 288 K 时的电压-电流曲线(黑线)和积分球法测得的功率-电流曲线(蓝线),对电压-电流曲线进行微分处理得到注入电流为 20 mA 时该激光器的串联微分电阻约为 17  $\Omega$ 。由于微腔激光器的尺寸远小于衬底的尺寸,因此器件的串联微分电阻主要受到刻蚀的微腔腔体尺寸与电导特性的影响,微腔腔体内上、下 InP 限制层的电导率主要由掺杂特性决定,根据电阻公式  $R=\rho L/S$  粗略估算为 36.5  $\Omega$ 。此外,上接触电极面积较小引起的接触电阻也会对器件的总串联微分电阻产生重要影响(N 型端接触面积较大,对总串联微分电阻的贡献较小)。根据测得的总串联微分电阻可知,上接触电阻为 17~23.5  $\Omega$ ,进一步优化欧姆接触工艺有利于降低器件总串联微分电阻。

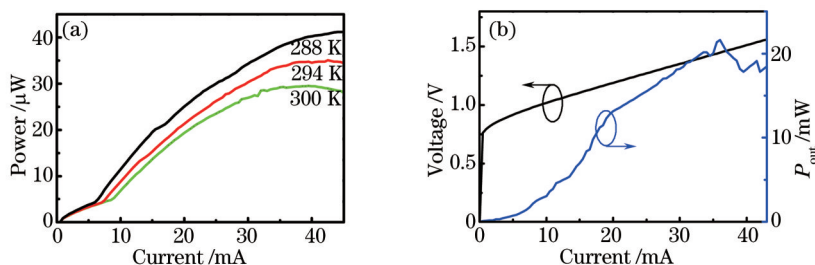


图 2 (a) TEC 温度为 288、294、300 K 时的功率-电流曲线;(b) TEC 温度为 288 K 时的电压-电流曲线和积分球法测得的功率-电流曲线

Fig.2 (a) Power-current curves at TEC temperatures of 288, 294, 300 K; (b) voltage-current and power-current curves at TEC temperature of 288 K

### 2.2 微腔激光器的热阻

通过两个步骤测得激光器的热阻:1)在一定电流条件下,测得激光器波长随着TEC温度变化的关系 $\Delta\lambda/\Delta T$ ;2)固定温度条件下,测得激光器波长随着损耗功率变化的关系 $\Delta\lambda/\Delta P_d$ ,则热阻为<sup>[11,16-17]</sup>

$$Z_T = \left(\frac{d\lambda}{dT}\right) \cdot \left(\frac{d\lambda}{dP}\right)^{-1} \quad (1)$$

图3(a)所示为注入电流强度为30 mA时波长随TEC温度的变化关系,图3(b)所示为不同温度下的光谱图。通过线性拟合,可以得到 $\Delta\lambda/\Delta T=0.117$  nm/K的波长红移速度。功率损耗分为有源区损耗和非有源区损耗(焦耳热),功率损耗为

$$P_d = P_{in}(1 - \eta) = P_j + P_{act} \quad (2)$$

式中 $P_j = I^2 R$ 为器件本身结电阻产生的焦耳热, $P_{act}$ 为激光器工作时非有源区内部产生的热量, $P_{in} = IV$ , $\eta = P_{out}/P_{in}$ 为激光器的光电转换效率。根据图2(b)所示,计算可得 $\eta=0.3$ 和功率耗散 $P_d$ 。根据实验测试结果,可以得到波长随功率耗散的变化关系,并线性拟合得到斜率 $\Delta\lambda/\Delta P_d$ 。

将TEC温度固定在288 K,通过改变注入电流调节电注入功率,可以得到波长与功率耗散的关系,如图4(a)所示。 $T_{hs}$ 为TEC温度,与衬底温度相同。图4(b)为不同注入电流下的光谱。根据器件激光波长的红移量和波长随温度的红移速率(0.117 nm/K),计算有源区的实际工作温度。图5的散点所示为TEC温度为288 K时器件有源区工作温度随注入电流的变化关系,通过拟合可得温度随注入电流的变化关系为<sup>[11]</sup>

$$\Delta T = 0.0075I^2 + 0.64I + 25.2 \quad (3)$$

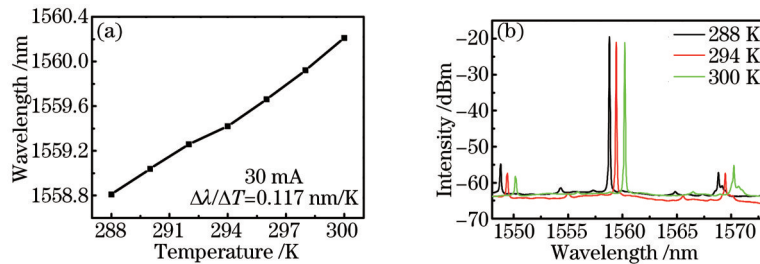


图3 微腔激光器工作在30 mA电流时,(a)模式波长随TEC温度的变化关系与(b)不同温度下的光谱

Fig.3 (a) Lasing wavelength versus TEC temperature and (b) lasing spectra measured at different TEC temperatures for microcavity laser under injection current of 30 mA

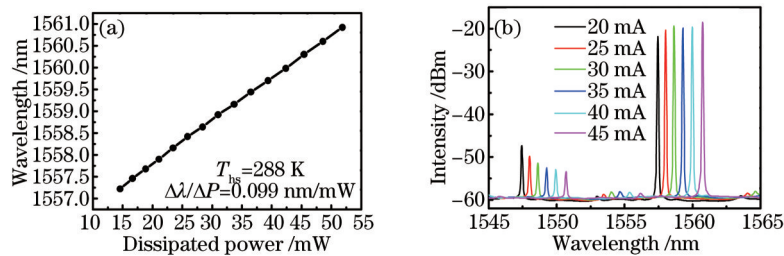


图4 (a) TEC温度为288 K时模式波长随功率耗散的变化;(b)温度为288 K时不同注入电流下的光谱

Fig.4 (a) Lasing wavelength versus the applied electric power at 288 K; (b) lasing spectra for the microcavity laser under different injection currents at 288 K

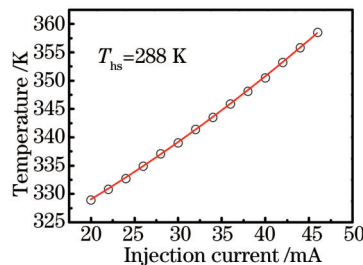


图5 TEC温度为288 K时器件有源区工作温度随注入电流的变化

Fig.5 Practical laser temperature in active region versus injection current at TEC temperature of 288 K

### 3 椭圆微腔激光器温度特性模拟

利用基于有限元的商用软件 Comsol 构建一个微腔激光器三维模型进行模拟分析,其结构如图 1 所示,并且应用电流模块和固体传热模块多物理场耦合计算其热场分布,参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>。半导体微腔激光器正常工作时产热由很多因素构成,主要考虑的热源包括:1) 非有源区产生的焦耳热;2) 有源区中电子与空穴非辐射复合和自发辐射产热。

表 1 激光器各层材料及参数列表

Table 1 Parameters and materials of each layer in the laser

Material	Thickness / $\mu\text{m}$	$\kappa /(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c /(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Ti/Pt/Au	0.3	150	19.3	0.13
BCB	4	0.3	1	2.18
$\text{Si}_3\text{N}_4$	0.3	19	2.5	3.3
$\text{p}^+-\text{InGaAs}$	0.12	6	4.8	0.31
$\text{p}-\text{InP}$	1.5	40	4.8	0.31
AlGaInAs MQWs	0.3	6	4.8	0.31
$\text{n}-\text{InP}$	120	40	4.8	0.31
Au/Ge/Ni	0.3	150	19.3	0.13

#### 3.1 焦耳热计算

椭圆微腔激光器的焦耳热主要应用电流模块计算,激光器外加工作电流引起的体材料焦耳热以及欧姆接触层产热采用通常的材料焦耳热计算公式:

$$Q_{\text{joul}} = I^2 R, \quad (4)$$

式中  $Q_{\text{joul}}$  为焦耳热功率,  $R$  为材料电阻,可由电阻率计算公式推导,  $I$  为注入电流。

#### 3.2 椭圆微腔激光器有源区内热计算

有源区由固体传热模块计算,激光器有源区内由于非辐射复合以及自发辐射复合产生的热功率可用经验公式表示为<sup>[8,17]</sup>

$$Q_{\text{act}} = V_j \left\{ I_{\text{th}} (1 - \eta_{\text{sp}} f) + (I_{\text{b}} - I_{\text{th}}) \times [1 - \eta_{\text{ex}} - (1 - \eta_{\text{i}}) f \eta_{\text{sp}}] \right\}, \quad (5)$$

式中  $V_j$  为节电压,  $I_{\text{b}}$ 、 $I_{\text{th}}$  为注入电流和阈值电流,  $\eta_{\text{sp}}$ 、 $\eta_{\text{i}}$ 、 $\eta_{\text{ex}}$  和  $f$  分别表示自发辐射量子效率、内量子效率、外量子效率及逃逸系数。

温度分布由热传导方程计算<sup>[12]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q_v + \nabla \cdot (\kappa \nabla T), \quad (6)$$

式中  $\rho$  为材料密度,  $c$  为热容,  $q_v$  为热源的热功率密度,  $\kappa$  为导热系数。

考虑到空气中的热交换条件,满足

$$\kappa \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) = h(T - T_0), \quad (7)$$

式中  $h$  为空气的热交换系数。计算温度分布时采用稳态模型,激光器热沉初始温  $T_0$  及周围环境温度为 288 K,与实际测试条件一致。同时在计算区域的其他边界,设定纽曼边界条件。

对比实验测得和模拟得出的有源区内部温升与注入电流之间的关系,如图 6 所示,25~40 mA 处两条曲线重合度很好。总体而言,模拟计算与实验测得的结果较为吻合,模拟使用的多物理场耦合模型能够可靠分析微腔激光器在工作中有源区的温升。

由于该类器件的正装结构,微腔结构内电阻及非辐射复合产生的热量主要通过较厚的 InP 衬底向金属热沉扩散。InP 材料的导热系数约为  $67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,而下方的 Cu 热沉的导热系数约为  $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,因此微腔芯片中 InP 衬底的厚度对器件热阻有明显影响。图 7 所示为计算得到的不同衬底厚度条件下微腔激光器的温度分布。图 7(a)为  $T_{\text{th}}=288 \text{ K}$  时随衬底厚度变化的微腔激光器温度分布,当衬底厚为 90、120、150  $\mu\text{m}$  时,有源区温度分别为 335、338、341 K。图 7(b)所示为衬底水平方向的温度分布,随着衬底水平方向尺寸变大,

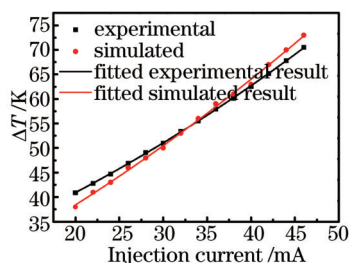


图6 模拟计算和实验测得激光器内部温升与注入电流的关系

Fig.6 Simulated and measured temperatures change of laser at different injected currents

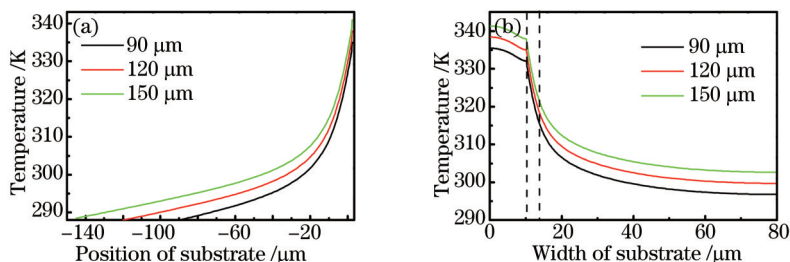


图7 微腔激光器温度分布。(a)垂直方向;(b)水平方向

Fig.7 Temperature distribution of microcavity laser. (a) Vertical direction; (b) horizontal direction

激光器水平方向散热加强,有源层的温度逐渐降低,但当尺寸大于72 μm时有源区温度保持稳定。在实验中将器件解理为300 μm×300 μm左右的管芯,水平方向上满足散热极限。

侧向限制的微腔激光器,多采用BCB填平侧向限制,由于其导热系数非常低(0.3 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),激光器有源区和上限制层散热差。为了增强器件散热性,刻蚀腔体时只刻蚀掉器件周围10 μm的InP材料,并且在激光器和BCB之间以及器件上表面引入层厚为0.3 μm的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(导热系数为29 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),形成侧向导热机制。

图8(a)所示为实际器件结构的二维截面图,箭头表示散热主要向衬底的垂直方向及水平方向扩散,在BCB及器件上表面存在明显温升。图8(b)所示为引入侧向导热的器件结构的二维截面图,箭头表示热量可以从Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>侧向扩散到未刻蚀的InP上。对比上述两种方法,采用侧向温度扩散机制的结构使器件发光区温度降低了10 K,更有利于器件在高功率下工作。

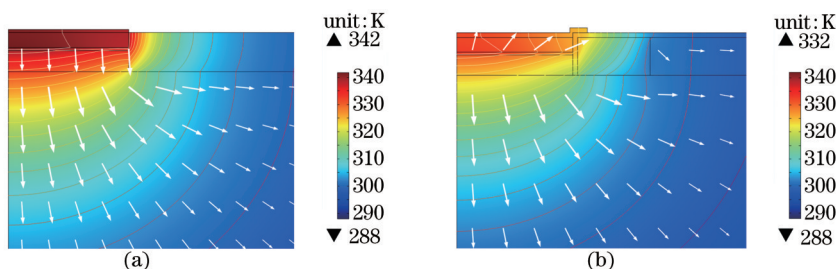


图8 288 K时热沉下微腔激光器二维截面温度分布。(a)实际器件结构;(b)侧向导热机制器件结构

Fig.8 Two-dimensional temperature distributions of microcavity laser at heat-sink temperature of 288 K. (a) Actual structure; (b) proposed structure with a thermal shunt used

## 4 结 论

通过实验和有限元方法模拟研究了椭圆微腔激光器的热特性。实验测试了微腔激光器波长随温度及功率的变化,求得热阻为 $Z_T=0.846$  K/mW。通过有限元方法模拟计算得到激光器的热阻为 $Z_T=0.893$  K/mW,与实验结果的偏差小于5%,实验结果和理论计算相吻合。研究表明,引入侧向温度扩散机制可有效降低有源区的温度。

## 参 考 文 献

1 Huang Y Z, Yang Y D, Wang S J, *et al.*. Whispering-gallery microcavity semiconductor lasers suitable for photonic integrated circuits

- and optical interconnects[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(12): 3447–3453.
- 2 Ou F, Li X Y, Liu B Y, *et al.*. Enhanced radiation loss-based radial-waveguide-coupled electrically pumped microresonator lasers with single-directional output[J]. Opt Lett, 2010, 35(10): 1722–1724.
- 3 Pan Biwei, Yu Liqiang, Lu Dan, *et al.*. 20 kHz narrow linewidth fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502007.  
潘碧玮, 余力强, 陆丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502007.
- 4 Fang Jinxiang, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502009.  
方金祥, 董世运, 徐宾士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502009.
- 5 Huang Jing, Hu Xiuhuan, Chen Weibiao. LD-pumped electro-optically  $Q$ -switched 946 nm Nd:YAG laser with pulse repetition rates of 1 kHz[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602008.  
黄晶, 胡秀寒, 陈卫标. LD 抽运 1 kHz 电光调  $Q$  946 nm Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602008.
- 6 Hu Liming, Li Zaijin, Qin Li, *et al.*. Thermal analysis of high-power, high-duty-cycle laser diode array[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1056–1060.  
胡黎明, 李再金, 秦莉, 等. 高占空比大功率半导体激光阵列热特性分析[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1056–1060.
- 7 Zheng X G, Li Z J, Li T, *et al.*. Analysis simulation of facet temperature in semiconductor lasers[C]. 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, 2012: 111–114.
- 8 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1002003.  
张建伟, 宁永强, 张星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002003.
- 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): 1439–1443.  
王文, 高欣, 周泽鹏, 等. 百瓦级多芯片半导体激光器稳态热分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1439–1443.
- 10 Wang Shengnan, Bo Baoxue, Xu Liuyang, *et al.*. Thermal analysis on semiconductor laser with non-injection region[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(8): 970–973.  
王胜楠, 薄报学, 许留洋, 等. 基于腔面非注入区的半导体激光器的热特性分析[J]. 发光学报, 2014, 35(8): 970–973.
- 11 Zou L X, Huang Y Z, Liu B W, *et al.*. Thermal and high speed modulation characteristics for AlGaInAs/InP microdisk lasers[J]. Opt Lett, 2010, 35(10): 1722–1724.
- 12 Sui S S, Tang M Y, Yang Y D, *et al.*. Sixteen-wavelength hybrid AlGaInAs/Si microdisk laser array[J]. IEEE J Quantum Electron, 2015, 51(4): 2600108.
- 13 Pu R, Wilmsen C W, Geib K M, *et al.*. Thermal resistance of VCSEL's bonded to integrated circuits[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11(12): 1554–1556.
- 14 Van Campenhout J, Rojo-Romeo P, Van Thourhout D, *et al.*. Thermal characterization of electrically injected thin-film InGaAsP microdisk lasers on Si[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(6): 1543–1548.
- 15 Sysak M N, Park H, Fang A W, *et al.*. Experimental and theoretical thermal analysis of a hybrid silicon evanescent laser[J]. Opt Express, 2007, 15(23): 15041–15046.
- 16 Wipiejewski T, Young D B, Thibeault B J, *et al.*. Thermal crosstalk in  $4 \times 4$  vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(8): 980–982.
- 17 Camps I, Gonz'alez J C, Sanchez M. Calculation of the thermal resistance and temperature distribution in blue-green semiconductor lasers[J]. Semicond Sci Technol, 1997, 12(12): 1574–1578.

栏目编辑: 宋梅梅