

文章编号: 0253-2239(2010)04-1055-06

高占空比大功率半导体激光阵列热特性分析

胡黎明^{1,2} 李再金^{1,2} 秦 莉¹ 杨 晔^{1,2} 王 焯^{1,2} 刘 云¹ 王立军¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态开放实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 针对微通道热沉封装半导体激光阵列(LDA)建立三维有限元热分析模型,对其在20%高占空比工作时的瞬态和稳态温度分布进行模拟分析。模拟结果表明加电流后的几十微秒内有源区温度缓慢上升,此后相邻发光单元之间发生热交叠,温度快速上升,最后由于热弛豫积累效应达到热平衡;稳态时有源区温度分布呈现与器件结构一致的周期性,各发光单元温度分布一致,温升集中在有源层电极区内,绝缘区温升快速减小,出光面温度较高,180 A电流下工作时沿腔长方向最大存在3 K的温差。试验测试不同电流下工作时的输出特性,得到器件的有源区温升及稳态热阻与模拟结果基本吻合。

关键词 激光器;半导体激光阵列(LDA);温度分布;有限元法;高占空比

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1055

Thermal Analysis of High-Power, High-Duty-Cycle Laser Diode Array

Hu Liming^{1,2} Li Zaijin^{1,2} Qin Li¹ Yang Ye^{1,2} Wang Ye^{1,2} Liu Yun¹ Wang Lijun¹

(¹ Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A three-dimensional finite element thermal analysis model is presented for a micro-channel heat sink packaged semiconductor laser diode array(LDA). The transient and steady-state temperature distribution of the laser diode array is simulated when it works under the condition of 20% high duty cycle. It is found that the temperature of the active region rises slowly within the first few dozen microseconds after turning on current. And then, the temperature rises rapidly due to the heat flux interleaving between adjacent emitters, and finally a steady state is reached due to the thermal relaxation and accumulation effect. The static temperature distribution presents periodicity as the same of the array structure and no temperature difference exists among each emitter. The temperature rising concentrates in the electrode region of the active layer, and the temperature drops rapidly in the insulated region. The emitting facet has a higher temperature, and a max 3 K temperature difference exists along the cavity when the working current is 180 A. The output characteristic of the laser diode array is measured when it works under different currents. The temperature rising of the active region and the steady-state thermal resistance are basically coincident with the simulation.

Key words lasers; laser diode array (LDA); temperature distribution; finite element method; high duty cycle

1 引言

大功率半导体激光器阵列由于其体积小、效率

高和寿命长等优势在工业、医学以及军事领域得到了广泛的应用^[1~3]。随着半导体激光器功率的不断

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-06-03

基金项目: 国防基础科研(A1320070032)、装备预先研究(61501060108)和吉林省科技厅发展计划(20075001,20086011)资助课题。

作者简介: 胡黎明(1984—),男,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: henryhulm2003@163.com

导师简介: 王立军(1946—),男,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光技术方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

提高,热效应的影响越来越明显,成为限制激光器特性的关键因素。激光器工作在高占空比时会产生大量的废热,如果不能及时散发将引起有源区温度的上升,导致波长红移,阈值电流增大,输出功率和转换效率降低,寿命缩短,甚至导致激光器的失效^[4]。因此,对大功率半导体激光器阵列在高占空比下工作的热特性进行分析是十分必要的。实验上可以利用拉曼散射、反射调制、光致发光和热成像等方法研究激光器工作时的温度分布情况,但是仪器造价昂贵,操作复杂^[5~7];理论上对热传导式封装列阵的二维温度分布研究较多,而对微通道热沉封装列阵的三维温度分布的分析很少^[8~10]。本文利用 ANSYS 软件建立三维有限元模型,对微通道热沉封装列阵在 20% 占空比下工作的瞬态和稳态温度分布进行模拟分析;测试了 20% 占空比和不同工作电流下列阵的输出特性,利用纵模光谱法计算半导体激光列阵的稳态热阻。

2 模 型

大功率半导体激光器阵列工作时热流传导服从热传导方程,瞬态时微分传导方程为

$$cg \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(t), \quad (1)$$

式中 T 为温度, t 为时间, c 为材料热容, g 为材料密度, κ 为材料热传导系数, $Q(t)$ 为热功率密度。稳态时温度不随时间变化,即有

$$\kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0. \quad (2)$$

半导体激光线阵工作时产生的内部热源主要由以下 4 个部分组成^[10~13]: 激光器工作时有源区内部具有极大的载流子密度和光子密度,大量的非辐射复合、辐射吸收以及自发辐射吸收产生的有源区内部热流密度

$$Q_{\text{act}} = (V_j/d_a) \{ j_{\text{th}}(1 - \eta_{\text{sp}}f) + (j - j_{\text{th}})[1 - \eta_{\text{ex}} - (1 - \eta_i)f\eta_{\text{sp}}] \}, \quad (3)$$

盖层以及衬底材料对有源区自发辐射逃逸光子的吸收产生的热流密度

$$Q_{\text{cap}} = Q_{\text{sub}} = \frac{V_j j_{\text{th}} \eta_{\text{sp}} f}{2d_i}, \quad (4)$$

有源区以外其它各层材料产生的焦耳热流密度

$$Q_{\text{jou}} = j^2 \rho_i, \quad (5)$$

欧姆接触电阻产生的热流密度

$$Q_c = \frac{j^2 \rho_c}{d_c}, \quad (6)$$

式中 V_j, j, j_{th} 分别为结电压、注入电流密度、阈值电流密度, d_a 和 d_c 分别为有源层厚度和欧姆接触层厚度, d_i 为除有源层外的第 i 层材料的厚度, ρ_i 和 ρ_c 分别为第 i 层材料的电阻率和欧姆接触电阻, η_{sp}, η_i 和 η_{ex} 分别为自发辐射内量子效率、受激发射内量子效率和外微分量子效率, f 为光子穿透限制层到达衬底和盖层的逃逸系数^[12,14]:

$$f = 1 - [1 - (n_c/n_a)^2]^{1/2}, \quad (7)$$

式中 n_c 和 n_a 分别为限制层和有源层有效折射率。

本文分析的是 GaAsP/InGaP/AlGaInP 材料系半导体激光列阵,结构示意图如图 1 所示。

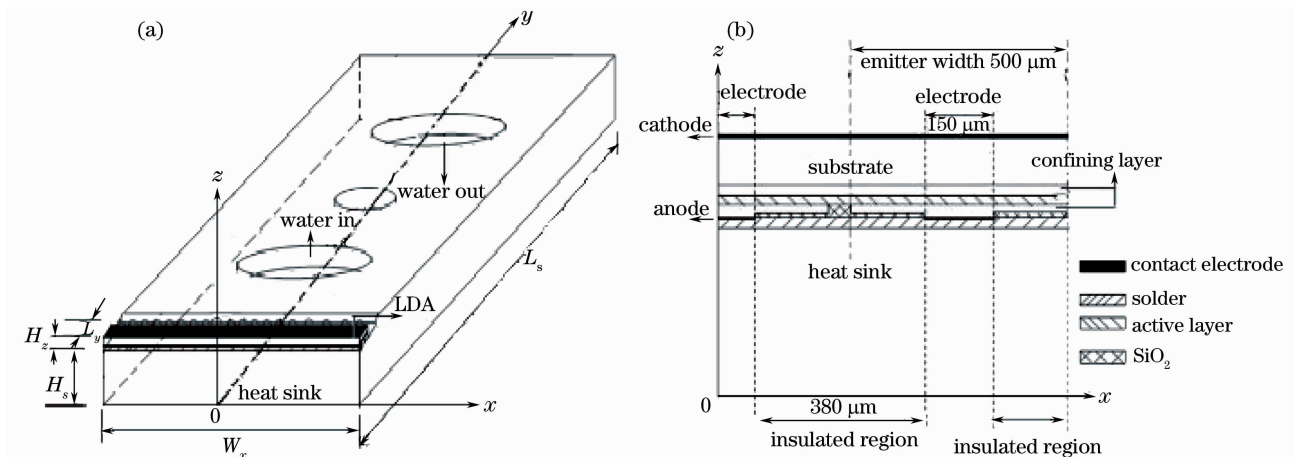


图 1 半导体激光列阵示意图。(a) LDA 三维示意图;(b) LDA 相邻发光单元截面图

Fig. 1 Scheme of the laser diode array. (a) three-dimensional scheme of LDA; (b) scheme of cross sectional view of the adjacent emitters of LDA

列阵宽 W_x 为 1 cm, 发光单元周期为 500 μm , 发光单元台面条宽为 150 μm , 腔长 L_y 为 1 mm, 器件厚度 H_z 为 120 μm , 绝缘层厚度为 0.15 μm , 隔离

沟道腐蚀到有源区, P 面向下烧结在微通道热沉上, In 焊料厚度为 10 μm , P 面电极厚度为 0.5 μm , N 面电极厚度 1 μm , 其它的材料参数如表 1 所示。

表 1 模拟中所用材料参数

Table 1 Materials parameters used in the simulation

Material	$\kappa/[\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})]$	$c/[\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	$g/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho/(\Omega\cdot\text{cm})$
n-GaAs	46	0.327	5.318	5×10^{-4}
n-[Al _{0.3} Ga _{0.7}] _{0.51} In _{0.49} P	8	0.337	4.2014	1.3×10^{-2}
Ga _{0.51} In _{0.49} P	15.7	0.312	4.46728	
GaAs _{0.86} P _{0.14}	21	0.325	5.1528	
Ga _{0.51} In _{0.49} P	15.7	0.312	4.46728	
p-[Al _{0.3} Ga _{0.7}] _{0.51} In _{0.49} P	8	0.337	4.2014	2.8×10^{-2}
p-Ga _{0.51} In _{0.49} P	15.7	0.312	4.46728	6.9×10^{-2}
p-GaAs	46	0.327	5.318	5×10^{-3}
Au	301	0.1323	19.32	
In	83.7	0.239	7.31	
Cu	385	0.385	8.96	
SiO ₂	2	0.73	2.2	

模拟时所作假设和边界条件:

1) 把全部热源集中到有源区^[12,15], 假设热流密度均匀分布在电极区内, 绝缘区无热源分布, 且各发光单元热源一致;

2) 忽略管芯与周围空气的热对流和热辐射作用

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{|x|=W_x/2} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0, L_y} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=(H_s+H_z)} = 0; \quad (8)$$

3) 忽略热沉表面自然对流热交换, 假设微通道中水流可以把热量全部带走, 热沉底部温度恒定为 T_r

$$T|_{z=0} = T_r; \quad (9)$$

4) 器件各层材料间满足温度和热流连续分布

$$T_i = T_{i+1}, \quad k_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=z_i} = k_{i+1} \left. \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \right|_{z=z_{i+1}}; \quad (10)$$

5) 初始温度为热沉温度

$$T|_{t=0} = T_r. \quad (11)$$

3 模拟分析与实验结果

模拟分析了 LDA 在 20 °C 热沉温度 T_r 和 20% 占空比(200 μs , 1000 Hz)下工作时的温度分布, 忽略 LDA 热阻变化的影响, 工作电流为 180 A, $V_j = 1.8 \text{ V}$, $j_{\text{th}} = 8.7 \times 10^2 \text{ A}/\text{cm}^2$, $\eta_{\text{sp}} = 0.6$, $\eta_i = 0.9$, $\eta_{\text{ex}} = 0.83$, $f = 0.62$ 。

3.1 瞬态热分布

图 2 给出 LDA 相邻发光单元有源层在开始一个脉冲周期内的瞬态温度分布变化情况。由图 2 可知, 加电流后的 0.1~10 μs 时间内有源层电极区内温度开始上升, 中心温度最高, 绝缘区温度基本保持

在初始温度 293 K; 10~50 μs 期间靠近电极区的绝缘区温度开始缓慢上升; 50 μs 后整个绝缘区温度开始缓慢上升, 电极区内温升加快; 200 μs 时有源区中心温度达到最大的 301.8 K; 200 μs 后电流消失, 电极区内温度开始快速下降, 但由于横向热流的注入以及绝缘层 SiO₂ 的热导率相对较低, 热量不易向下传递, 导致绝缘区温度继续缓慢上升, 最后有源区温度达到相对一致。由于热积累效应, 一个周期内热量不能完全散去, 下一周期将从更高的初始温度开始升温。

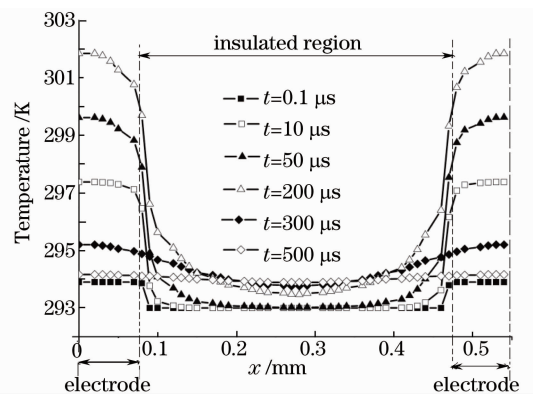


图 2 相邻发光单元有源层瞬态温度分布图

Fig. 2 Transient temperature distributions of the active layer between two adjacent emitters

图 3 给出了 LDA 有源区中心温度随脉冲电流注入时间的变化情况。由图可以看出温度变化大致分为三个阶段: 加电流后的前 50 μs 时间内有源区温度上升较缓慢; 50 μs 到 15 ms 时间内由于热弛豫积累效应促使温度快速上升; 15 ms 后温度上升缓

慢;大约 25 ms 后温度趋于恒定的 304.72 K,器件进入热稳态,温度主要由热沉材料及其结构决定。

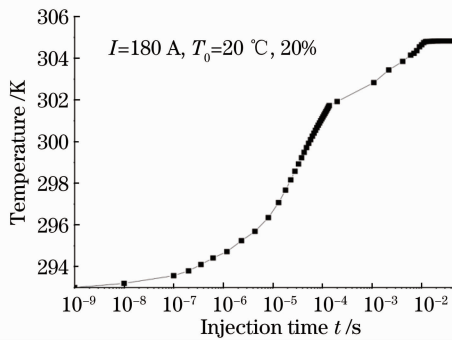


图 3 有源层中心温度随脉冲电流注入时间变化曲线
Fig. 3 Temperature of the active layer at the central emitter versus injection time of pulse

3.2 稳态热分布

由以上分析可知,25 ms 后 LDA 进入稳态工作,因此有必要对其稳态温度分布情况进行分析。图 4 给出了 LDA 在 20 °C 热沉温度、20% 占空比和 180 A 电流驱动下工作时达到稳态时的有源区(xy 面)温度分布情况。

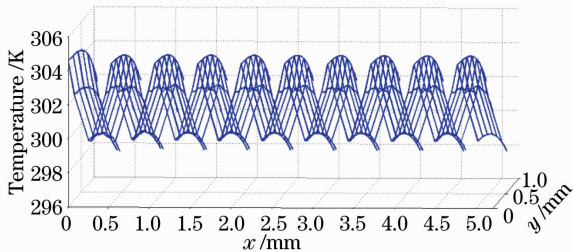


图 4 线阵有源区(xy 平面)稳态温度分布图
Fig. 4 Steady-state temperature distribution of the active layer (xy plane) of LDA

由图 4 可以看出稳态工作时有源区内部沿 LDA 芯片宽度(x 轴)方向温度呈现与器件结构一致的周期性分布,各发光单元温度分布一致,温升主要集中在条形电极区内,绝缘区温升快速减小,隔离沟道上方温度最低。有源区出射腔面温度较高,达 304.72 K,沿腔长(y 轴)方向温度先缓慢下降,靠近反射腔面时温度迅速下降,前后两腔面最大存在 3 K 的温差。这主要是由封装的不对称性造成的:出射腔面位于热沉边缘,热流只能沿垂直方向一维传递,而反射腔面远离热沉边缘,热流可以沿垂直和水平方向二维传递,散热性能增强。

图 5 给出了在 20 °C 热沉温度、20% 占空比、180 A 电流驱动下 LDA 出射表面(xz 面)的温度分布情况。

首先讨论热沉温度分布:由图 5 可知,沿 z 轴方

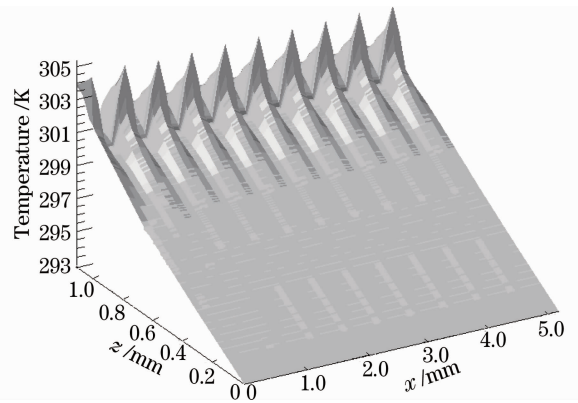


图 5 线阵出射表面(xz 平面)稳态温度分布图
Fig. 5 Steady-state temperature distribution of emitting facet (xz plane) of LDA

向向上温度逐渐上升,热沉底部温度保持水温 293 K 不变,底部附近热沉温度升高较小且分布均匀;靠近焊接界面处热沉温度呈现与管芯内温度分布相似的周期性,电极区下方温度高,绝缘区下方温度有所下降。LDA 管芯内温度较热沉温度高,以下对各发光单元温度分布进行分析。

沿 z 轴方向向上,电极区内温度先上升后下降,有源区中心温度出现尖峰,最高为 304.72 K;绝缘区内出射表面沿 z 轴方向向上温度不断升高,且越靠近电极区温升越大,但较电极区内温度要低。这主要是因为稳态工作时有少许热流从电极区内横向流出,且绝缘层热导率很低,热流不易向下传递,从而导致温度的上升。但距离电极区越远,热流传递越少,温度升高也越小。

3.3 实验结果

半导体激光列阵在 T_r 热沉温度下工作时有源区温升 ΔT 可以表示成下式^[16]:

$$\Delta T = T - T_r = R_{th} P_{thermal} = R_{th} P_{in} (1 - \eta_e), \quad (12)$$

$$P_{in} = IV_j \frac{\tau}{\Sigma}, \quad (13)$$

式中 T 为有源区温度, R_{th} 为热阻, $P_{thermal}$ 为平均热耗散功率, P_{in} 为输入电功率, η_e 为电光转换效率, V_j 为结电压, I 为输入电流, τ 为脉冲宽度, Σ 为脉冲周期。

利用大功率半导体激光器综合参数测试仪测试线阵在 0.4% (100 μ s, 40 Hz) 低占空比下工作的光谱特性,其中工作电流为 50 A,热沉温度分别为 10 °C, 15 °C, 20 °C 和 25 °C,得到中心波长分别为 798.2, 799.6, 800.8 和 802 nm,由此得出中心波长随温度的变化系数 $\partial\lambda/\partial T$ 约为 0.25 nm/°C。图 6 给出了 LDA 在不同工作电流条件下测试的输出功率和转换效率的拟合曲线。

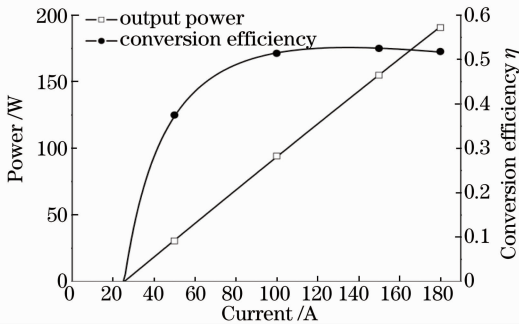


图 6 LDA 输出功率和转换效率与电流的变化关系

Fig. 6 Output power and conversion efficiency versus current

由图 6 可知, LDA 的阈值电流为 25 A, 电流从 50 A 增加到 180 A 时, 输出功率从 31 W 增大到 190.4 W, 电光转换效率由 37.5% 变为 51.8%, 最大可达 135 A 时的 52.7%。

图 7 给出了电流分别为 50, 100, 150 和 180 A 时 LDA 中心波长以及模拟的有源区温升与相应的平均热耗散功率的关系曲线。电流从 50 A 增大到 180 A 时, 中心波长从 801.4 nm 红移到 803.7 nm, 相应的有源区温升由 2.4 K 上升到 11.6 K, 与模拟得到的 3 K 和 11.72 K 基本吻合。由图 7 可知, 拟合得到的中心波长随平均热耗散功率的变化系数 $\partial\lambda/\partial P_{\text{thermal}}$ 为 0.0816, 结合(12)式得出 LDA 的稳态热阻值为

$$R_{\text{th}} = \frac{\partial T}{\partial P_{\text{thermal}}} = \frac{\partial\lambda/\partial P_{\text{thermal}}}{\partial\lambda/\partial T} = \frac{0.0816}{0.25} = 0.3264 \text{ K/W},$$

与理论模拟出的 0.32 K/W 基本吻合, 从而验证了模拟的正确性。

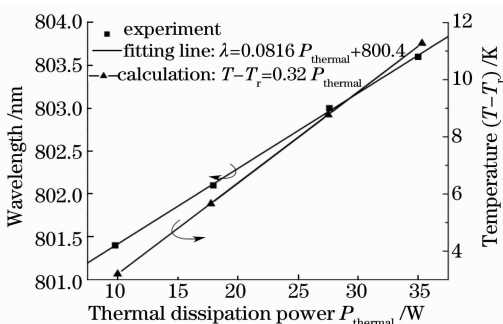


图 7 中心波长和有源区温升跟热功率的关系

Fig. 7 Central wavelength and temperature rise of active region versus dissipation power

4 结 论

利用 ANSYS 软件模拟分析了微通道热沉封装

列阵在 20% 高占空比和 180 A 电流下工作的瞬态与稳态温度分布。加电流后的前 50 μs 内有源区热流主要沿垂直方向传递, 相邻发光单元之间热流互不交迭, 各发光单元有源区电极区内温度同时缓慢上升; 随着时间的推移热流由电极区沿垂直和平行于结方向传递, 相邻发光单元间发生热交迭, 温度快速上升, 由于热弛豫积累效应, 若干周期后达到稳态热平衡。稳态温度呈周期性分布, 温升主要集中在有源层条形电极区内, 绝缘区温升迅速减小; 由于封装的不对称性, 沿腔长方向存在最大 3 K 的温差。试验测试 LDA 在不同电流下工作的输出特性, 最大功率达 190.4 W, 电光转换效率为 51.8%, 得到的有源区温升跟模拟结果接近, 稳态热阻为 0.3264 K/W, 与模拟结果 0.32 K/W 吻合得很好, 验证了理论模拟的可行性。

参 考 文 献

- 1 J. G. Endriz, M. Vakili, G. S. Browder *et al.*. High power diode laser arrays [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 952~965
- 2 Harald König, Günther Grönninger, Peter Brick *et al.*. Brilliant high power laser bars for industrial applications [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687616
- 3 Shan Xiaonan, Zhang Jing, Wang Lijun. Design of 980 nm high-power semiconductor laser therapeutic equipment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s): 435~438
单肖楠, 张晶, 王立军. 980 nm 大功率半导体激光治疗仪的设计 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 435~438
- 4 H. J. Yi, J. Diaz, I. Eliashevich *et al.*. Temperature dependence of threshold current density J_{th} and differential efficiency η_d of high-power InGaAsP/GaAs ($\lambda = 808 \text{ nm}$) lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(3): 253~255
- 5 J. M. Rommel, P. Gavrilovic, F. P. Dabkowski. Photoluminescence measurement of the facet temperature of 1 W gain-guided AlGaAs/GaAs laser diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(11): 6547~6549
- 6 P. W. Epperlein, G. L. Bona, P. Roentgen. Local mirror temperatures of red-emitting (Al) GaInP quantum-well laser diodes by Raman scattering and reflectance modulation measurements [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(6): 680~682
- 7 Jens W. Tomm, Fritz Weik, Thomas Elsaesser *et al.*. Analysis of thermal images from diode lasers: temperature profiling and reliability screening [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(203503): 1~3
- 8 Roland Puchert, Artur Börwolff, Michael Voss *et al.*. Transient thermal behavior of high power diode laser arrays [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2000, **23**(1): 95~100
- 9 Xie Hongyun, Chen Guoying, An Zhenfeng *et al.*. Temperature distribution analysis of high power laser arrays in static working condition [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2003, **24**(10): 1084~1088
谢红云, 陈国鹰, 安振峰等. 大功率半导体激光器阵列稳态温度分布分析 [J]. *半导体学报*, 2003, **24**(10): 1084~1088
- 10 Hu Liming, Li Zaijin, Qin Li *et al.*. Characteristics of high power al-free quantum-well laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 379~384

- 胡黎明, 李再金, 秦 莉 等. 大功率无铝量子阱半导体激光阵列特性研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 379~384
- 11 Zhang Xiaobo, Gao Dingsan. The thermal effects in semiconductor laser arrays[J]. *J. on Communications*, 1990, **11**(5): 34~38
- 张晓波, 高鼎三. 阵列式半导体激光器中的热特性[J]. 通讯学报, 1990, **11**(5): 34~38
- 12 Setsuko Murata, Kazutoshi Nishimura. A simple new laser diode array model for thermal interaction analysis [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(9): 4715~4723
- 13 Zhang Lei, Cui Bifeng, Huang Hongjuan *et al.*. Steady-state temperature distribution changes of stripe quantum well laser caused by solder void[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1203~1207
- 张 蕾, 崔碧峰, 黄宏娟 等. 焊料空隙对条形量子阱激光器温度分布的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1203~1207
- 14 Joanne S. Manning. Thermal impedance of diode lasers: comparison of experimental methods and a theoretical model[J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(5): 3179~3184
- 15 W. B. Joyce, R. W. Dixon. Thermal resistance of heterostructure lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**: 855~862
- 16 Song Haipeng, Wen Jimin, Zeng Xiongwen *et al.*. Research of pulse injection method for measuring LD chip temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 407~410
- 宋海鹏, 温继敏, 曾雄文 等. 测量激光器结温的脉冲注入法研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 407~410