

文章编号: 0258-7025(2007)09-1203-05

# 焊料空隙对条形量子阱激光器 温度分布的影响

张 蕾<sup>1,2</sup>, 崔碧峰<sup>1</sup>, 黄宏娟<sup>1</sup>, 郭伟玲<sup>1</sup>, 王智群<sup>1</sup>, 沈光地<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100022; <sup>2</sup> 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要** 针对量子阱半导体激光器建立了内部的热源分布模型, 利用有限元方法模拟计算得到了条形量子阱半导体激光器的三维稳态温度分布, 分析了芯片与热沉间的焊料空隙对芯片内部稳态温度分布的影响。模拟结果表明焊料空隙的位置和尺寸都将影响到芯片内部的温度分布, 焊料空隙的存在将导致空隙上方的芯片内部出现局部热点。随着焊料空隙的增大, 芯片内热点区域增大, 温度增高。位于芯片的条形电极中心下方的焊料空隙引起的芯片内部局部温升最大, 并且沿腔长方向光出射腔面上温度相对较高, 易引起光出射腔面上正反馈的电热烧毁, 与实验结果吻合。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器; 三维温度分布; 焊料空隙

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Steady-State Temperature Distribution Changes of Stripe Quantum-Well Laser Caused by Solder Void

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, CUI Bi-feng<sup>1</sup>, HUANG Hong-juan<sup>1</sup>,  
GUO Wei-ling<sup>1</sup>, WANG Zhi-qun<sup>1</sup>, SHEN Guang-di<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Laboratory of Opto-Electronic Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)  
<sup>2</sup>Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract** A model of internal heat source distribution is presented for quantum-well laser. Three-dimensional temperature distribution of the stripe quantum-well laser is simulated by using the finite element method, and the influence of solder voids between chip and heat sink on the steady-state temperature distribution is discussed. It is found that the chip's internal temperature distribution is influenced by the position and size of solder voids. The localized hot spot may result from the nether solder voids, and the strong localized temperature rises and the hot spot expands with the expanding of the void's dimension. Simulated result shows further that the strongest temperature rise is caused by solder voids under the center of the electrode stripe, and moreover, the highest temperature lies at the front facet. So catastrophic optical damage (COD) will be found at the front facet most possibly, which is in agreement with the test.

**Key words** laser technique; semiconductor laser; three-dimensional temperature distribution; solder void

## 1 引言

半导体激光器是一种高效率的电子-光子转换

器件, 在光纤通信、微加工、信息处理等诸多领域有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。但是由于在半导体激光器中不可避免地存在各种非辐射复合、自由载流子吸收等

收稿日期: 2007-01-24; 收到修改稿日期: 2007-04-28

**基金项目:** 国家 973 计划 (2006CB604902), 国家 863 计划 (2004AA311030), 十五国家科技攻关项目 (2003BA316A01-01-08), 国家自然科学基金 (60506012), 北京市科委重点项目 (D0404003040221), 北京市教委项目 (kz200510005003) 和北京市人才强教计划项目 (05002015200504) 资助课题。

**作者简介:** 张 蕾 (1977—), 女, 山西人, 北京跟踪与通信技术研究所工程师, 北京工业大学光电子技术实验室博士研究生, 主要从事半导体光电子器件的研究。E-mail: zlsx369@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 沈光地 (1939—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为半导体光电子器件。E-mail: gdshen@bjut.edu.cn

损耗机制,使得相当部分注入的电功率将转化为热量,热量的积累将引起激光器温升,导致激光器的寿命下降<sup>[3]</sup>。为了获得高的输出功率及长期可靠的工作稳定性,必须及时消除因耗散功率所转化的热量,其中芯片与热沉之间的焊接技术是散热的一个关键环节<sup>[4~6]</sup>。在芯片与热沉的焊接过程中由于热沉的加工平整度不够好、焊料制备过程中产生杂质、热沉金属化中形成大颗粒以及局部焊料与芯片间浸润不好等都有可能引起芯片与热沉之间出现焊料空隙,从而影响芯片与热沉之间的热传导。并且有关半导体激光器的失效统计研究表明,30%的早期失效是由于焊料空隙引起的<sup>[6]</sup>。因此,本文针对条形量子阱半导体激光器建立了热源分布模型,利用有限元方法模拟分析了焊料空隙对 GaAs/InGaAs 条形量子阱半导体激光器内部温度场分布的影响,从而进一步解释了老化实验中出现的现象。

## 2 热源模型

关于半导体激光器的热源分布有许多模型<sup>[7~9]</sup>,经过分析,本文对热源模型进行了改进,认为半导体激光器内部热源主要分为以下几部分:

1) 有源区在工作状况下会产生极大的载流子密度和光子密度,会有大量的非辐射复合、辐射吸收以及自发辐射吸收,因此会产生大量的热,有源区内部热流密度为

$$Q_{\text{active}} = \frac{V_j}{d_{\text{active}}} [j_{\text{th}}(1 - \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}}) + (j - j_{\text{th}})(1 - \eta_i) + (j - j_{\text{th}})\eta_i(1 - \eta_{\text{ex}})], \quad (1)$$

式中  $d_{\text{active}}$  为有源区的厚度,  $V_j$  为 pn 结上的电压降,  $j$  为注入电流密度,  $j_{\text{th}}$  为阈值电流密度,  $\eta_{\text{sp}}$  为自发发射内量子效率,  $\eta_i$  为受激辐射内量子效率,  $f_{\text{sp}}$  为自发辐射光子从有源区的逃逸因子,  $\eta_{\text{ex}}$  为出射效率。

2) 盖层中的热源以及衬底上面的一小部分来自对有源区自发辐射逃逸出的光子的吸收,热流密度表示为

$$Q_{\text{cap}} = Q_{\text{topsub}} = j^2 \rho_i + \frac{1}{2} \times \frac{V_j j_{\text{th}} \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}}}{d_i}, \quad (2)$$

式中  $\rho_i$  代表每一层的电阻率,  $d_i$  代表每一层的厚度。

3) 其他层的热源都是焦耳热的形式,热流密度为

$$Q_i = j^2 \rho_i. \quad (3)$$

4) 合金层中的热流密度用接触电阻表示为

$$Q_c = \frac{j^2 \rho_c}{d_c}, \quad (4)$$

式中  $\rho_c$  为合金层与 GaAs 接触的电阻率,  $d_c$  为合金层厚度。

## 3 计算与分析

激光器达到稳定的工作状态后,遵循热传导微分方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = 0, \quad (5)$$

式中  $k_x, k_y, k_z$  分别为  $x, y, z$  方向的热传导系数,  $Q$  为物体内部的热流密度,对于半导体激光器就是上述各层中的热源。图 1 为 GaAs/InGaAs 条形量子阱半导体激光器的结构示意图。依据对称性,为了减小计算量,选取图 1 中右半部分进行计算。计算中选取的边界条件为:1) 忽略管芯与周围空气的热交换。2) 考虑热沉与空气在自然对流下的热交换,并且将热沉放置在一个制冷器上,制冷器温度稳定在环境温度 300 K。

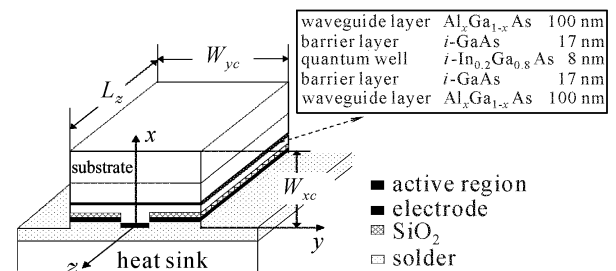


图 1 量子阱半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quantum-well laser

实验制备了条形波导量子阱半导体激光器,腔面经过硫钝化处理后消除了部分界面态,因此忽略由于腔面附近界面态引起的腔长方向的热源不均匀性<sup>[10]</sup>,利用有限元方法,根据上述模型模拟计算了 GaAs/InGaAs 量子阱半导体激光器的三维热分布。计算时选取的参数为  $V_j = 1.3 \text{ V}$ ,  $j_{\text{th}} = 200 \text{ A/cm}^2$ ,  $j = 500 \text{ A/cm}^2$ ,  $\eta_{\text{sp}} = 0.8$ ,  $f_{\text{sp}} = 0.5$ ,  $\eta_i = 0.96$ ,  $\eta_{\text{ex}} = 0.6$ , 台面条形电极为  $100 \mu\text{m}$ , 器件宽度为  $600 \mu\text{m}$ , 腔长为  $1000 \mu\text{m}$ , 腐蚀深度为  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  绝缘膜  $0.2 \mu\text{m}$ , 整个器件减薄到  $100 \mu\text{m}$ , P 面向下烧结在热沉上, In 的厚度为  $10 \mu\text{m}$ 。其他参数见文献<sup>[11]</sup>。

图 2 是芯片与焊料之间为理想全接触时芯片内部的三维稳态温度分布图。图 2(a) 为三维温度分布云图,图 2(b) 为光出射腔面的  $xy$  平面稳态温度分布,图 2(c) 为有源区的  $yz$  平面稳态温度分布。由图 2 可知,  $x$  轴,  $y$  轴和  $z$  轴的温度梯度由条形电

极中心向两边均逐渐减小,最高温度出现在有源区的条形电极中心处。在垂直于结的方向上( $x$ 轴),从金属层至衬底温度先升后降,衬底温度高于金属层的温度,有源层的温度比其他层都高。在平行于结的方向上( $y$ 轴),温升集中在条形电极内,温度由条形中心向两侧呈递减趋势,条形边缘温度下降很快。沿腔长方向( $z$ 轴),从光出射腔面到光反射腔面温度

先为缓变递减趋势,在反射腔面附近温度陡降,这是由于沿腔长方向封装的不对称性造成的。对于TO3封装,激光器的光出射腔面位于热沉边缘,热沉与芯片的接触点只能靠 $x$ 向和 $y$ 向热传导散热,而光反射腔面处于热沉中部,相应的热沉接触点通过三维热传导散热,散热较快,因此温度上升相对较慢。

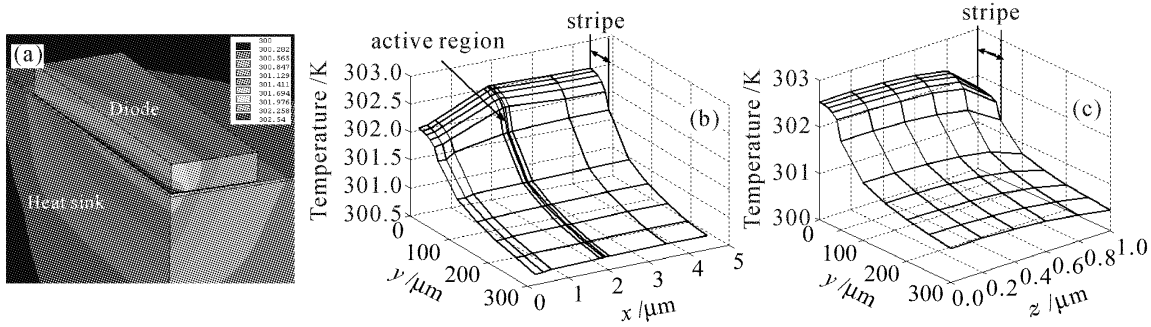


图 2 芯片内部稳态温度分布图

(a) 三维温度分布云图;(b)  $xy$  平面( $z = 0$ ); (c)  $yz$  平面(有源区)

Fig. 2 Static temperature distribution of semiconductor laser

(a) three-dimensional nephogram; (b)  $xy$  plane ( $z = 0$ ); (c)  $yz$  plane (active region)

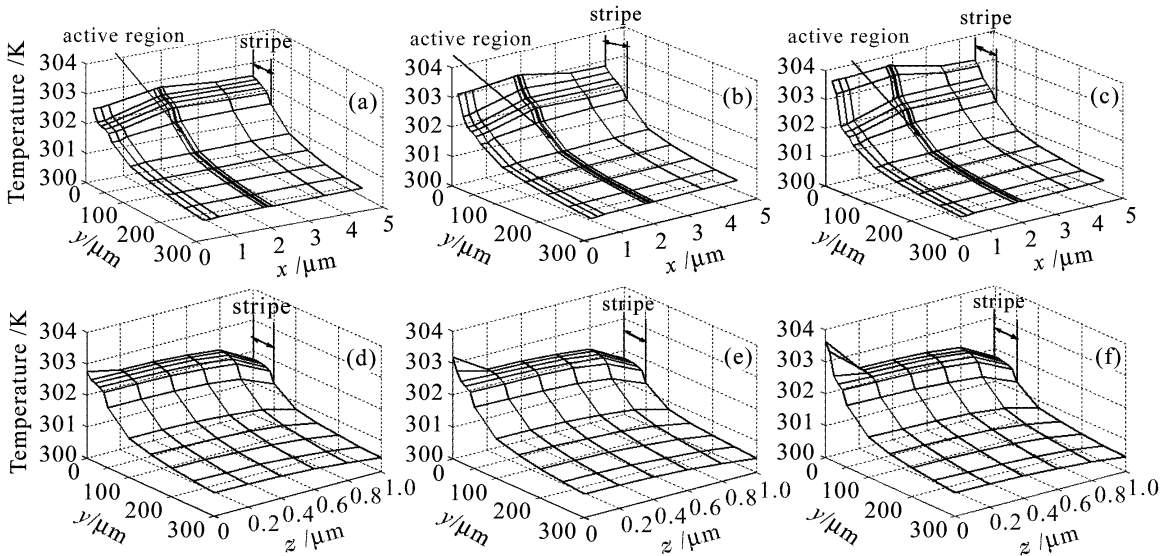


图 3 焊料空隙位于条形电极中心下方时,芯片内部稳态温度分布随空隙尺寸的变化

(a)~(c)  $xy$  平面( $z = 0$ ); (d)~(f)  $yz$  平面(有源区)

Fig. 3 Temperature distribution of semiconductor laser versus the size of the solder void under the center of the stripe

(a)~(c)  $xy$  plane ( $z = 0$ ); (d)~(f)  $yz$  plane (active region)

(a), (d)  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ ; (b), (e)  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ; (c), (f)  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$

由分析可知,光出射腔面上的温度上升较快,并且通常光出射端面位于热沉的边缘,而由于边角的存在,热沉边缘处焊料的蒸镀均匀性会相对差一些,焊料空隙在热沉边缘出现的概率相对较大。图 3 为当焊料空隙位于芯片的条形电极中心下方时,芯片内部温度分布曲线。存在  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  的焊料空隙即表示芯片与焊料之间存在  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  的

未接触面积。与图 2 比较,由图 3 可知芯片条形电极中心出现局部热点,并且随着空隙的增大,热点区域增大,温度增高。在垂直于结的方向上( $x$ 轴),随着空隙的增大,空隙上方的金属层温度上升较快,最终超过衬底温度,有源层的温度仍然保持最高。在平行于结的方向上( $y$ 轴),条形内沿  $y$  轴的温差增大,空隙对条形外温度的影响很小。沿腔长方向( $z$ 轴),

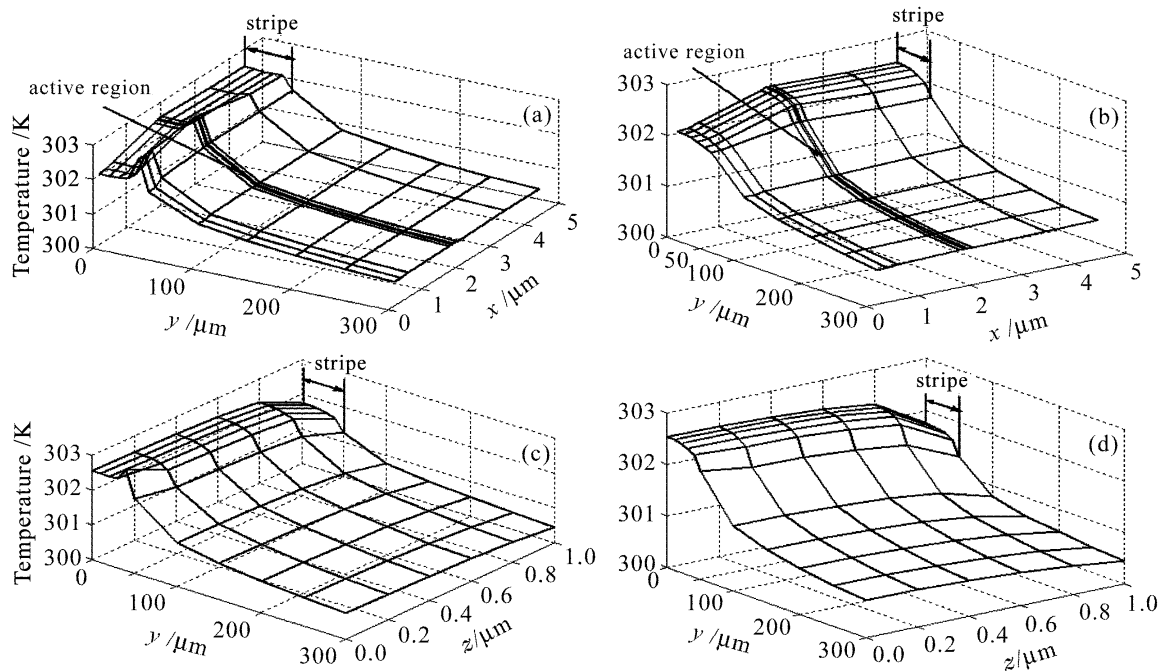


图 4  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  的焊料空隙位于条形电极边缘下方(a),(c)和条形外下方(b),(d)时,芯片内部稳态温度分布  
(a),(b)  $xy$  平面( $z = 0$ ); (c),(d)  $yz$  平面(有源区)

Fig. 4 Temperature distribution of semiconductor laser with  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  solder void under the edge of the stripe (a),(c) and the outside of the stripe (b),(d)  
(a),(b)  $xy$  plane ( $z = 0$ ); (c),(d)  $yz$  plane (active region)

只有前腔面附近温度有所升高。最高温度仍然在光出射腔面的有源区的条形电极中心。图 4 为  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  的焊料空隙位于芯片的条形电极边缘下方和条形外下方时,芯片内部温度分布曲线。当芯片的条形电极边缘下方存在空隙时,与理想接触时相比,光出射腔面附近条形电极内沿  $y$  轴的温度分布趋势发生改变,条形电极边缘的温度反而高于条形中心的温度,最高温度出现在空隙上方的光出射腔面的有源区的条形电极边缘,与理想接触时相比温度有所升高,但温升小于相同尺寸的条形电极中心下方空隙导致的温升,空隙对条形外温度的影响同样很小。当芯片的条形电极外下方存在  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  的空隙时,芯片内部温度分布与理想全接触时差别很小。

通过老化实验前后观察对比样品的电子显微形貌和功率变化,发现功率退化较大的样品,其芯片与热沉之间的烧结界面均不同程度地存在焊料空隙,并且在焊料空隙上方常常伴随有腔面烧毁的痕迹<sup>[12]</sup>,典型形貌如图 5 所示。由模拟结果可知焊料空隙的存在会导致空隙上方的芯片内部出现局部热点,在老化过程中温度的增加又使吸收系数增大,形成恶性循环,于是导致器件功率退化较大,甚至最终导致灾变性(COD)的损伤。又由模拟结果可知,在

沿腔长方向上光出射腔面上温度相对较高,并且芯片条形电极下方的焊料空隙引起的局部温升相对较大,所以条形电极下方的焊料空隙在光出射腔面处更容易引起正反馈的电热烧毁,因此在老化过程中焊料空隙上方常常伴随有腔面烧毁的痕迹。

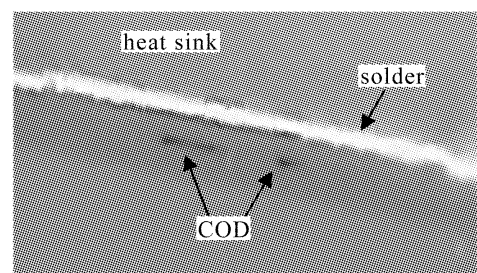


图 5 烧结界面存在焊料空隙时腔面灾变性损伤  
Fig. 5 Catastrophic optical damage for the facet with solder void below at the thermally sprayed interface

## 4 结 论

利用有限元方法模拟计算得到了 GaAs/InGaAs 条形量子阱半导体激光器的三维温度分布,分析了焊料空隙对芯片内部温度分布的影响。模拟结果表明虽然制冷装置可以有效地改善器件的散热特性,但焊料空隙的存在将导致空隙上方的芯片内部出现局部热点,随着空隙的增大,热点区域增大,

温度增高。条形电极外下方的焊料空隙对温度的影响小于条形边缘处下方的空隙的影响, 条形中心下方空隙引起的局部温升最大。解释了老化实验中功率退化较大的样品, 其芯片与热沉之间的烧结界面均不同程度地存在焊料空隙, 并且焊料空隙上方常常伴随有腔面烧毁痕迹的现象。

### 参 考 文 献

- 1 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:GdVO<sub>4</sub> laser end-pumped by laser-diode-array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):681~683  
杜晨林, 秦连杰, 孟宪林 等. LD 抽运高功率连续波 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):681~683
- 2 Ming C. Wu, N. A. Olsson, D. Sivco *et al.*. A 970 nm strained-layer InGaAs/GaAlAs quantum well laser for pumping an erbium-doped optical fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(3):221~223
- 3 Witzigmann Bernd, S. Mark, A. Hybertsen. Theoretical investigation of the characteristic temperature  $T_0$  for semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2003, **9**(3):807~815
- 4 Tang Chun, Wu Deyong, Gao Songxin *et al.*. Package technique for CW 40 W 808 nm quantum-well linear array diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):513~516  
唐 淳, 武德勇, 高松信 等. 连续 40 W 808 nm 量子阱线阵二极管激光封装技术[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):513~516
- 5 Gao Songxin, Wu Deyong, Wang Jun *et al.*. Multiplayer bonding technique for high power diode laser package [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5):447~449  
高松信, 武德勇, 王 骏 等. 高功率二极管激光器封装的多层焊接技术[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(5):447~449
- 6 Gao Songxin, Wei Bin, Lü Wenqiang *et al.*. Failure analysis of high power diode laser array [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(Suppl.):97~100  
高松信, 魏 彬, 吕文强 等. 高功率二极管激光器失效特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊):97~100
- 7 T. Kobayashi, Y. Furukawa. Temperature distributions in the GaAs-AlGaAs double-heterostructure laser below and above the threshold current [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1975, **14**(12):1981~1986
- 8 J. P. Van der Ziel, Naresh Chand. High-temperature operation (to 180 °C) of 0.98  $\mu\text{m}$  strained single quantum well In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(13):1437~1439
- 9 Lu Pengcheng, Cui Bifeng, Li Jianjun *et al.*. Transient thermal characteristic analysis of tunnel regeneration high-power semiconductor laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):518~522  
鲁鹏程, 崔碧峰, 李建军 等. 隧道再生大功率半导体激光器瞬态热特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):518~522
- 10 Tian Zengxia, Cui Bifeng, Xu Chen *et al.*. Study of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S passivation with facet of 808 nm laser diodes [J]. *Research & Progress of SSE*, 2006, **26**(2):201~204  
田增霞, 崔碧峰, 徐 晨 等. 808 nm 半导体激光器腔面硫酸钝化工艺研究[J]. *固体电子学研究进展*, 2006, **26**(2):201~204
- 11 Zhang Lei, Cui Bifeng, Guo Weiling *et al.*. Three dimension temperature distribution analysis of tunnel regeneration semiconductor Laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics* (to be published)  
张 蕾, 崔碧峰, 郭伟玲 等. 双有源区隧道再生半导体激光器温度场分布研究[J]. *半导体光电* (已录用)
- 12 Huang Yun, An Zhenfeng. The relationship of failure mechanisms and die sinter process of semiconductor laser [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2002, (5):11~14  
黄 云, 安振峰. 半导体激光器的主要失效机理及其与芯片烧结工艺的相关性[J]. *电子产品可靠性与环境实验*, 2002, (5):11~14