

doi: 10.3788/gzxb20164505.0514001

# 温度对高功率半导体激光器阵列“smile”的影响

王淑娜<sup>1</sup>, 张普<sup>1</sup>, 熊玲玲<sup>1</sup>, 聂志强<sup>1</sup>, 吴的海<sup>1</sup>, 刘兴胜<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 西安炬光科技股份有限公司, 西安 710077)

**摘 要:**用数值模拟与实验测试相结合的方法,研究了温度对“smile”的影响.利用有限元方法分别模拟计算了半导体激光器芯片键合及工作过程中激光器芯片中的热应力,模拟中假设激光器芯片的弯曲仅由热应力引起;计算结果表明,激光器芯片有源区的热应力随工作温度的升高而减小,由热应力导致的芯片的弯曲随温度升高而减小.实验结果表明,对于具有相同芯片、同一封装形式、同批次的器件,“smile”随温度的升高有增大或减小的趋势,这与封装前裸芯片的弯曲形态及封装热应力的综合作用有关;若封装前裸芯片为相对平直的或凸的,则封装后激光器的“smile”将随温度升高而减小;若封装前裸芯片为凹的,封装后的激光器芯片仍为凹的,则“smile”随温度升高而增大.

**关键词:**激光器;半导体激光器阵列;有限元方法;“smile”;热应力;温度

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)05-0514001-6

## Influence of Temperature on “Smile” in High Power Diode Laser Bars

WANG Shu-na<sup>1</sup>, ZHANG Pu<sup>1</sup>, XIONG Ling-ling<sup>1</sup>, NIE Zhi-qiang<sup>1</sup>, WU Di-hai<sup>1</sup>, LIU Xing-sheng<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Focuslight Technologies Co., LTD, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** By the numerical modeling and experimental test, the influence of temperature on “smile” was studied. By using the finite element method, the thermal stresses induced during bar bonding and operating process were simulated respectively. In simulations, it is assumed that the deformation of the laser bar is only caused by the thermal stress. The simulated results show that the thermal stress across the laser bar decreases with the increasing of heatsink temperature. As thus, the curve of the laser bar induced by packaging thermal stress will decrease with the increasing of the temperature. In this experiment, “smile” of five samples from the same wafer and batch was measured under different heatsink temperatures. Experimental results show that “smile” of the five samples increases or decreases as heatsink temperature increasing. The possible reason which is related with the combined action between the primitive bending shape of the bare bar and the mounting thermal stress. If the bare bar before packaging is flat or convex, “smile” of the diode laser bar will decrease as the heatsink temperature increasing. In addition, if the bare bar is concave and the laser bar is still concave after packaging, “smile” will increase with the increasing of heatsink temperature.

**Key words:** Laser; Diode laser array; Finite element method; “Smile”; Thermal stress; Temperature

**OCIS Codes:** 140.2010; 140.2020; 250.5960

## 0 引言

高功率半导体激光器包括单管、阵列、垂直叠阵、

水平阵列以及面阵,作为一种可靠的光源,已被广泛应用于工业、军事、娱乐显示、材料加工、医疗美容等众多领域<sup>[1-4]</sup>.通常认为,输出功率、转换效率和可靠性是评

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 61334010, 61404172)资助

第一作者:王淑娜(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为高功率半导体激光器封装. Email: wangshuna@opt. cn

导师:刘兴胜(1973-),男,研究员,博士,主要研究方向为高功率半导体激光器封装. Email: LIUXS@focuslight. com. cn

收稿日期:2015-12-04;录用日期:2016-01-26

<http://www.photon.ac.cn>

价高功率半导体激光器性能的三个重要指标.然而,对于半导体激光器阵列,“smile”(即近场非线性)与以上三个参量同等重要,因为泵浦源激光器阵列的近场非线性会对激光器系统的功率、效率、密集度、光束质量以及热管理水平产生显著影响<sup>[5]</sup>.高功率半导体激光器阵列的“smile”效应,即近场非线性,是指其输出光在快轴方向的非线性分布,即阵列中各发光单元不在同一水平线上分布<sup>[1]</sup>.“Smile”效应给光束准直、整形和光耦合带来巨大挑战,并已成为限制高功率半导体激光器更广泛应用的主要因素之一,因此对“smile”的影响因素进行研究显得尤为重要.目前关于半导体激光器阵列“smile”的研究主要集中在“smile”的产生机制、如何准确测量及减小、“smile”对光束质量的影响等方面<sup>[5-8]</sup>.

为了更清楚地掌握“smile”的产生机制,优化高功率半导体激光器的设计、封装工艺,以及为实现低“smile”提供指导,本文以典型的 60 W 808 nm 传导冷却封装高功率半导体激光器阵列为例,通过有限元数值模拟与实验测试相结合的方法,研究了温度对“smile”的影响,并分析了“smile”随温度变化的规律和机理.

## 1 数值模拟

### 1.1 高功率半导体激光器阵列及其有限元模型

以典型的 60 W 808 nm 传导冷却封装的高功率半导体激光器阵列研究对象,如图 1,其包含 19 个发光点,芯片宽度为 10 mm,发光单元宽度为 150  $\mu\text{m}$ ,30% 填充因子,腔长为 2 mm.

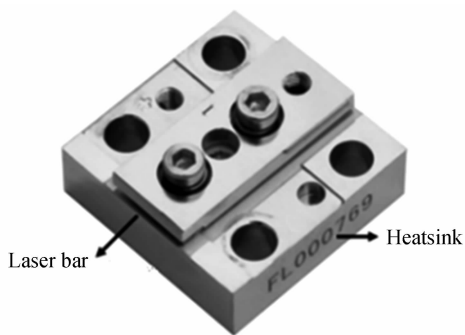


图 1 封装完好的高功率半导体激光器阵列  
Fig. 1 A completed high power diode laser bar

为提高计算效率,考虑半导体激光器结构的对称性,模型中采用镜面对称方式,只对激光器的一半进行模拟计算.模拟中,用六面体砖块结构搭建模型,已划分网格的三维有限元模型如图 2.模拟中,假设所有的材料是各向同性的,并且材料物性是恒定的,如表 1.

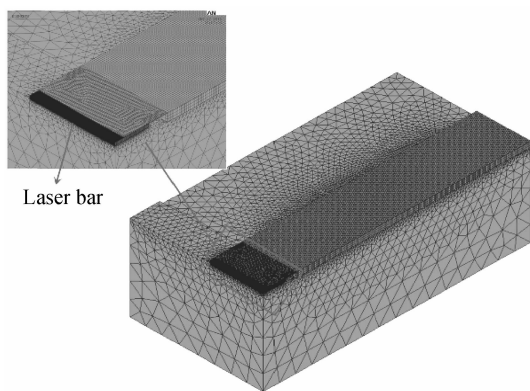


图 2 已划分网格的半导体激光器阵列的三维有限元模型  
Fig. 2 A meshed three-dimensional finite element model of diode laser bar

表 1 模拟中用到的材料特性参量<sup>[9-10]</sup>

Table 1 Materials parameters used in simulations

Material	Thermal conductivity/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Young's modulus/ Mpa	Coefficient of thermal expansion/ ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ )	Poisson's ratio
Cu	398	$128 \times 10^3$	16.5	0.36
Indium	82	$110 \times 10^3$	31	0.45
Au	315	$74 \times 10^3$	14.2	0.42
Pt	73	$170 \times 10^3$	5.02	0.39
Ti	21.9	$110 \times 10^3$	7.28	0.3
$\text{Si}_3\text{N}_4$	18	$290 \times 10^3$	2.9	0.27
GaAs	44	$750 \times 10^3$	6.4	0.3
GaAlAs	13.7	$847.5 \times 10^3$	4.97	0.34
Active region	66	$719 \times 10^3$	1.4	0.31
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25	$360 \times 10^3$	6.26	0.21

### 1.2 模拟结果

#### 1.2.1 芯片键合过程

在芯片键合过程中,当温度由焊料熔点降至室温时,由于激光器芯片、焊料、热沉等封装材料间的热膨胀系数不匹配,将会引入热应力,并导致激光器芯片发生弯曲.模拟中假设激光器芯片在封装前为理想平面,封装后芯片的弯曲(即“smile”的产生)仅由封装过程引入的热应力导致.模拟计算得到的封装回流过程引入的热应力(回流之后称为残余应力)如图 3,可以看出沿芯片宽度方向的热应力(等效应力)分布为中间大边缘小,最大热应力为 101.95 Mpa.此封装热应力将导致激光器芯片沿垂直 PN 结方向发生位移,模拟结果如图 4,封装后激光器芯片向上凸起,即形成“cry”形状,此结果与文献中描述一致<sup>[5]</sup>.此外,模拟得到的激光器芯片在垂直 PN 结方向的最大位移为 0.44  $\mu\text{m}$ .

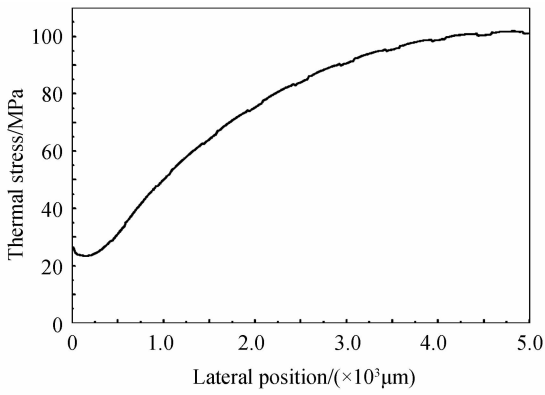


图3 封装过程引入的热应力分布曲线

Fig.3 Thermal stress distribution curve after bar bonding process

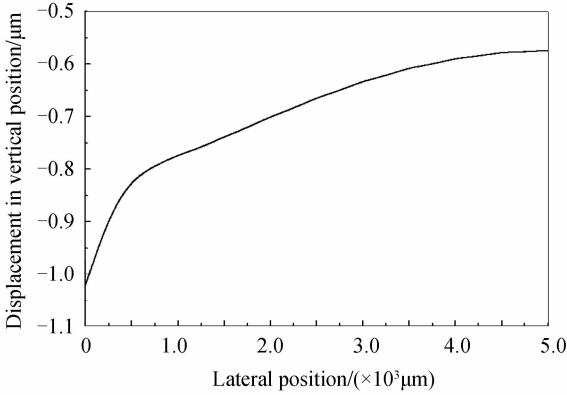
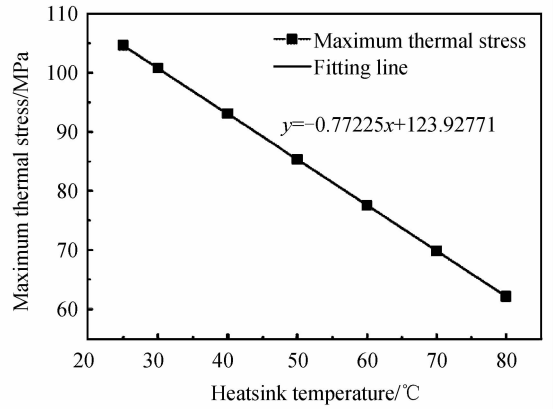


图4 封装后激光器芯片的位移分布曲线

Fig.4 Displacement distribution curve after bar bonding process

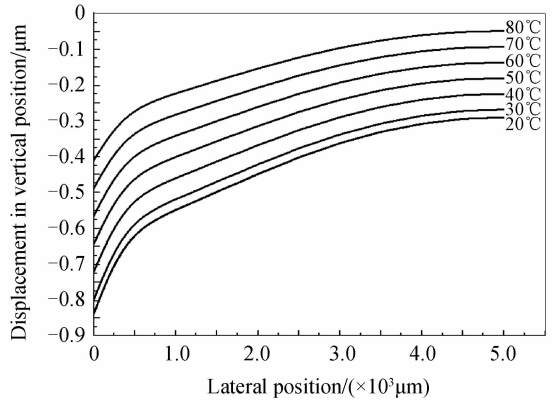
1.2.2 不同热沉温度工作

工作过程中,由于激光器的平均温度升高以及芯片与热沉间的温度梯度会导致热应力的产生<sup>[11]</sup>.封装之后,残余热应力已被引入激光器中,所以模拟激光器工作过程中的热应力时需将此残余应力考虑在内.模拟得到不同热沉温度工作时激光器芯片有源区的热应力分布曲线如图5(a),随着热沉温度的升高,激光器芯片中的热应力逐渐减小.图5(b)为拟合所得有源区最大热应力随温度变化的曲线,由图可看出:最大热应力

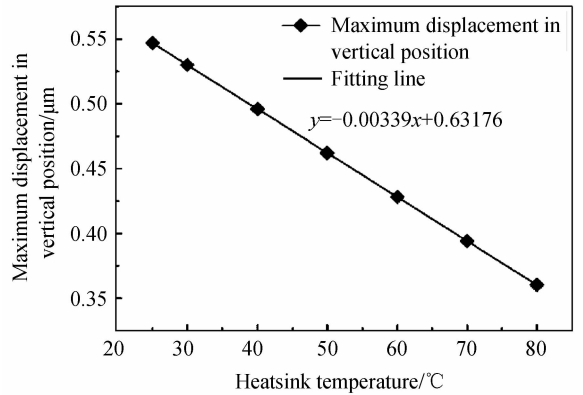


(b) The maximum thermal stress

图5 不同热沉温度工作时激光器芯片中的热应力  
Fig.5 The thermal stress in the laser bar operating under different heatsink temperatures



(a) The displacement distribution curves

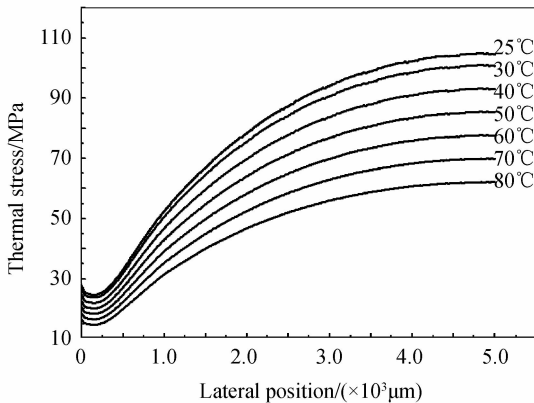


(b) The maximum displacement

图6 不同热沉温度工作时激光器芯片的位移

Fig.6 The displacement in the laser bar operating under different heatsink temperatures

随热沉温度升高而线性减小,热沉温度每升高10°C,最大热应力减小约7.72 MPa.相应地,不同热沉温度下由热应力引起的激光器巴条在垂直PN结方向的位移如图6,随着热沉温度的升高,激光器芯片的弯曲程度逐渐减小.由热应力引起的最大位移,随着温度升高而线性减小,温度每升高10°C,此最大位移减小约0.03 μm.



(a) The displacement distribution curves

## 2 实验测试

### 2.1 空间光谱

高功率半导体激光器阵列中每个发光单元的发射波长受晶片的均匀性以及封装相关的热和热应力效应影响,而且后者为主要因素<sup>[12]</sup>.发光单元结温的升高将引起波长的红移,例如,波长为 808 nm 的半导体激光器以 0.28 nm/°C 的速度向长波方向移动.另外,由于激光器巴条和安装衬底间热膨胀系数不匹配而产生的热应力将施加于激光器巴条上,引起带隙变化并影响波长,即压应力引起波长蓝移,张应力引起红移<sup>[13]</sup>.实验中,制备了 5 只相同芯片、同批次的 60 W 808 nm 钢焊料封装传导冷却高功率半导体激光器,从 1 到 5 分别编号.为排除热效应对波长的影响,在低占空比的脉冲条件 100  $\mu\text{s}@100\text{ Hz}$  下<sup>[14]</sup>,对 5 个实验样品的空间光谱进行了测试,结果如图 7.结果表明:总体趋势为中间发光点的波长比边缘发光点的波长短;另外,对于个别实验样品,临近边缘发光点的波长突然减小,基于剪切应力分布特点为——沿激光器芯片宽度方向中间小边缘大<sup>[15]</sup>,可能原因是剪切应力在这些发光点有更大的影响.由于热膨胀系数  $\alpha$  的不同,对于实验所用的砷化镓基 ( $\alpha_{\text{GaAs}} = 6.4 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) 激光器,使用铜热沉 ( $\alpha_{\text{Cu}} = 16.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) 进行封装时将产生压应力<sup>[16]</sup>,压应力将导致波长蓝移.由此根据低占空比的脉冲条件下测得的空间光谱的分布,可看出中间发光单元的波长发生了较多蓝移,进而可得出封装引入热应力的分布特征,即激光器巴条中的热应力中间大边缘小,这与第 1 节中模拟结果一致.

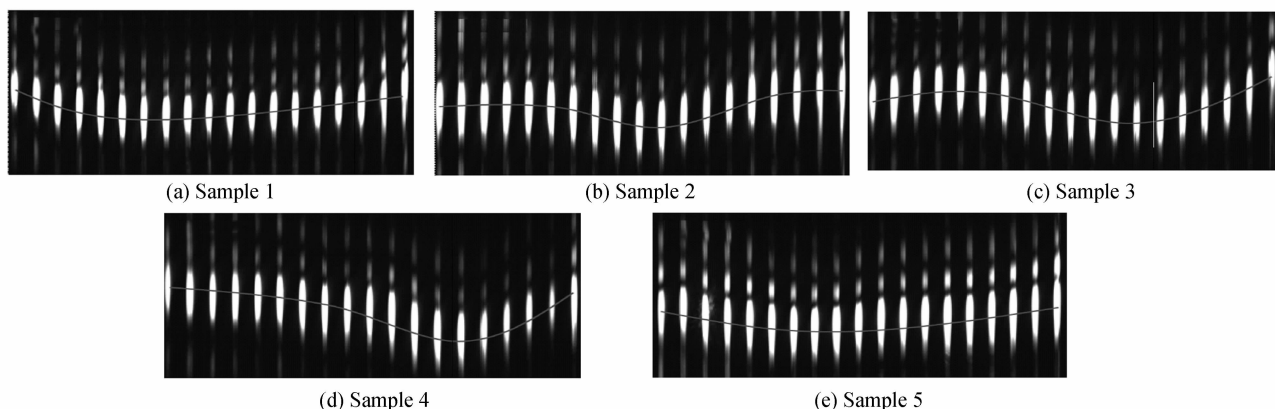


图 8 25°C 时 5 个实验样品的“smile”放大图

Fig. 8 Enlarged “smile” images of five experimental samples at 25°C

实验测试得到 5 个样品的“smile”随温度变化曲线如图 9,其中 1、2、3 号样品的“smile”值随温度的升高而缓慢增大,4 号样品的“smile”随温度升高呈减小的趋势,而在测量误差范围内 5 号样品的“smile”大小随温度基本不变.表 2 统计了这 5 个样品在 20°C 和 65°C 时的“smile”大小、变化量以及“smile”随温度变化的拟

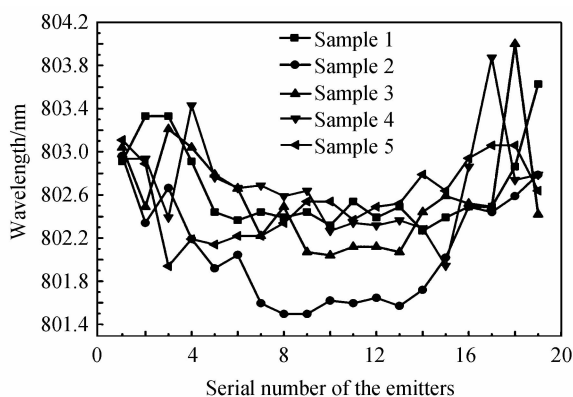


图 7 五个实验样品的空间光谱分布

Fig. 7 Spatial spectrum distributions of five samples

### 2.2 “smile”

器件工作时,通过热电冷却器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 控制激光器热沉底部的温度,并通过改变热沉温度,在 20~65°C (此处 65°C 为实验中保证实验样品的所有发光单元都亮的最高温度) 的温度范围内,分别测试了 5 个样品的“smile”值,其测量误差为  $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ .图 8 显示了 25°C 时实验测试得到的 5 个样品的“smile”放大图,这 5 个实验样品的“smile”具有不同的弯曲形状.有限元模拟中,假设封装前的激光器芯片是平直的,芯片的弯曲仅由封装过程引入的热应力引起,这样封装后激光器芯片将形成“cry”形状.而事实上,在封装前外延生长及晶片加工过程中会引入芯片的弯曲,另外由于一些工艺因素的影响,封装后激光器芯片将会出现各种不同的弯曲形状,即会出现形状各异的“smile”.

合曲线.在温度同样升高 45°C 时,样品 3 的“smile”值变化最大,为 0.49  $\mu\text{m}$ ;而样品 5 的变化最小,仅有 0.08  $\mu\text{m}$ ,在测量误差范围内可认为不变,这可能由测量误差所致.实验结果表明,对于同一封装形式、相同芯片、同批次的器件,“smile”随温度有不同的变化趋势.

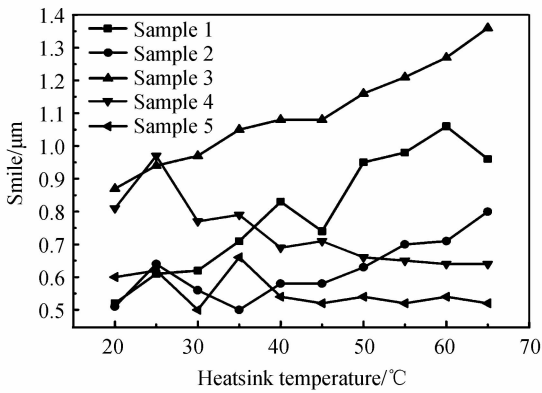


图9 五个样品的“smile”值随温度的变化曲线

Fig. 9 “Smile” of five samples under different temperature

表2 实验测得5个样品的“smile”值、变化量及“smile”随温度变化的拟合曲线

Table 2 Statistics of “smile” size, variation and fitting line of “smile” varying with temperature

Sample number	“Smile” at 20 °C/μm	“Smile” at 65 °C/μm	“Smile” variation/μm	Fitting line
1	0.52	0.96	0.44	$y=0.01156x+0.36655$
2	0.51	0.8	0.29	$y=0.00508x+0.40515$
3	0.87	1.36	0.49	$y=0.01x+0.674$
4	0.81	0.64	-0.17	$y=-0.00583x+0.98079$
5	0.6	0.52	-0.08	$y=-0.00189x+0.63636$

特性及温度差有关,而与封装前裸芯片是否弯曲无关.所以,模拟中认为封装前裸芯片为平直的,并不影响模拟得到的结论,即:封装热应力导致的芯片弯曲  $\epsilon_{\text{thermal}}$  将随温度的升高而减小.

结合不同的裸芯片弯曲形态及模拟结果,现作两种分析:1)若封装前的裸芯片为相对平直或向上凸的,由模拟得到封装过程引入的热应力导致的芯片弯曲为向上凸的,则封装过程将增大激光器芯片的弯曲.这样,由于工作时随着热沉温度的升高封装热应力引起的芯片弯曲逐渐减小,随之激光器芯片的弯曲程度将逐渐减小,即“smile”将随温度升高而减小.2)若封装前裸芯片为向下凹的,而封装热应力导致的芯片弯曲为向上凸的,如果叠加后的激光器芯片仍为凹的,即封装热应力导致的芯片弯曲削弱了原有裸芯片的弯曲程度.这种情况下,由于工作过程中随着热沉温度的升高封装热应力引起的芯片弯曲将减小,随之激光器芯片的弯曲程度将逐渐增大甚至恢复至封装前裸芯片时的弯曲程度,即出现“smile”随温度升高而增大的实验现象.实际中,由于封装前裸芯片的弯曲、封装过程中引入热应力的作用以及一些工艺因素的影响等,导致封装后的“smile”除了会出现“cry(凸)”、“smile(凹)”外,还会出现“S”型等其他形状,这些因素的综合作用将导致“smile”随温度有不同的变化规律.这为更清楚地了解“smile”的产生机制及减小“smile”具有重要的指导意义.

半导体激光器的“smile”主要由两部分组成:外延生长过程中由于衬底与外延层间晶格常量不匹配导致封装前裸芯片本身的固有形变  $\epsilon_{\text{int}}$ ,以及封装回流过程引入热应力导致的芯片形变  $\epsilon_{\text{thermal}}$ .则半导体激光器芯片的总形变,即“smile”的大小为

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{int}} + \epsilon_{\text{thermal}} \quad (1)$$

对于半导体激光器,由于芯片与热沉间热膨胀系数不匹配产生的热应力符合公式<sup>[5]</sup>,即

$$\sigma = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} (\alpha_1 - \alpha_2) (T_f - T_s) \quad (2)$$

式中, $E$ 为材料1和2的弹性模量, $\alpha$ 为热膨胀系数, $T_f$ 为焊料熔点, $T_s$ 为工作温度.由式(2),并结合应变  $\epsilon \propto \sigma$ ,可得出热应力导致的激光器芯片的弯曲仅与材料的

### 3 结论

以典型的60 W 808 nm 传导冷却封装的高功率半导体激光器阵列为例,通过数值模拟和实验测试相结合,研究了温度对高功率半导体激光器阵列“smile”的影响.数值模拟结果表明若封装前的裸芯片为理想的平面,封装过程引入的热应力导致的激光器芯片的弯曲将为“cry”形状,封装热应力导致的芯片弯曲将随热沉温度的升高而减小.实验测试得到,封装后的激光器芯片具有不同的弯曲形状,“smile”随温度升高会有增大或减小的趋势,这是封装前裸芯片的弯曲形态及封装过程中引入热应力间综合作用的结果.下一步计划针对不同的封装形式,包括:钢焊料封装、全金锡焊料封装等,研究封装结构对高功率半导体激光器阵列“smile”的影响,进而进一步深入研究“smile”随温度变化的规律及机制.本文对掌握“smile”的产生机制,优化高功率半导体激光器的设计、封装工艺,以及减小“smile”效应具有重要的指导意义.

#### 参考文献

- [1] LIU Xing-sheng. Packaging of high power semiconductor lasers[M]. ZHAO Wei, XIONG Ling-ling, LIU Hui. New York: Springer Science, 2015.
- [2] FRIEDRICH B. High power diode lasers technology and applications[M]. PETER L, REINHART P. New York: Springer Science, 2015.
- [3] FAIRCLOTH B. Present technology industrial applications and future prospects of high power diode lasers, Proceedings of SPIE- International Conference on Advanced Laser

- Technologies[C]. San Jose; SPIE, 2002, 1-15.
- [4] LIU Xing-sheng, DAVIS R W, HUGHES L C, *et al.* A study on the reliability of indium solder die bonding of high power semiconductor lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(013104): 013104.
- [5] WANG Jing-wei, YUAN Zhen-bang, KANG Li-jun, *et al.* Study of the mechanism of “smile” in high power diode laser arrays and strategies in improving near-field linearity, Proceedings of 59th Electronic Components and Technology Conference [C]. Piscataway; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2009, 837-842.
- [6] GUO Lin-hui, TANG Chun, WU De-yong, *et al.* Measurement of “smile” for high power diode laser array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 195-198.  
郭林辉, 唐淳, 武德勇, 等. 大功率二极管激光线阵的“smile”测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 195-198.
- [7] WANG Xiang-peng, LI Zai-jin, LIU Yun, *et al.* Smile effect and package technique for diode laser arrays[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 552-557.  
王祥鹏, 李再金, 刘云, 等. 半导体激光器的 smile 效应与封装技术[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 552-557.
- [8] LANG Chao, YAO Shun, CHEN Bing-zhen, *et al.* “Smile” effect on the beam quality for diode laser arrays[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, **39**(5): 0502006.  
郎超, 尧舜, 陈丙振, 等. 半导体激光器阵列的“smile”效应对光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502006.
- [9] MARTÍN-MARTÍN A, AVELLA M, IÑIGUEZ M P, *et al.* Thermomechanical model for the plastic deformation in high power laser diodes during operation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(7): 073105.
- [10] YAN Yi, GUAN You-liang, CHEN Xu, *et al.* Effects of voids in sintered silver joint on thermal and optoelectronic performances of high power laser diode [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2013, **135**(4): 041003.
- [11] SCHOLZ C. Thermal and mechanical optimization of diode laser bar packaging [D]. Aachen; RWTH Aachen University of Technology, 2007.
- [12] WANG Jing-wei, YUAN Zhen-bang, ZHANG Yan-xin, *et al.* Study of the mechanisms of spectral broadening in high power semiconductor laser arrays[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, **37**(1): 92-99.  
王警卫, 袁振邦, 张彦鑫, 等. 大功率半导体激光器阵列光谱展宽机理研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 92-99.
- [13] STAKSE R, SEBASTIEN J, WENZEL J, *et al.* Influence of mounting stress on polarization degree of electroluminescence of laser diode bars, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe - Technical Digest[C]. Piscataway; IEEE, 2000, 10-15.
- [14] LI Xiao-ning, ZHANG Yan-xin, WANG Jing-wei, *et al.* Influence of package structure on the performance of the single emitter diode laser [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, **2**(10): 1592-1598.
- [15] SCHLEUNING D, SCHOLZ K, GRIFFIN M, *et al.* Material survey for packaging semiconductor diode lasers, Proceedings of SPIE - High Power Diode Laser Technology and Applications [C]. Bellingham WA; SPIE, 2009, 71981K.
- [16] MARK L B, STEVEN D, KELSEY P, *et al.* Spectroscopic method of strain analysis in semiconductor quantum-well devices[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **96**(8): 4056-4065.