

文章编号: 1001-3806(2016)01-0033-05

## 同轴型激光器焊后偏移的理论及实验研究

周晶晶, 吴正辉\*

(中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** 为了研究同轴型激光器激光焊接产生的焊后偏移(PWS), 采用基于有限元热-结构耦合理论的分析方法, 建立了同轴型激光器3束激光焊接模型, 分析了激光焊接工艺参量对焊后偏移的影响规律, 并进行了激光锤校正实验研究, 获得了同轴型激光器激光焊接前后及校正后的耦合光功率值。结果表明, 同轴型激光器的焊后偏移受到3个焊点功率分布和位置分布等因素的影响; 耦合光功率在激光锤校正后整体呈上升趋势, 最大耦合光功率可恢复至94%, 有限元仿真分析对PWS的方向预测合理。这一结果对激光焊接同轴型激光器的生产具有一定的指导意义。

**关键词:** 激光技术; 焊后偏移; 激光焊接; 有限元模型; 激光锤

**中图分类号:** TG456.7 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.008

## Theoretical and experimental study on post-weld-shift of coaxial laser diodes

ZHOU Jingjing, WU Zhenghui

(State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to study laser welding post-weld-shift (PWS) of coaxial laser diodes based on finite element thermal theory and structural coupling theory, 3 beams laser welding model of coaxial laser diode was developed. Parameters affecting PWS were analyzed and meanwhile, correction experiment of laser hammer was studied. Coupling optical power value was obtained before and after laser welding and after correction. The simulation results demonstrate that power distribution and position distribution of three weld spots have influence on PWS of laser welding of coaxial laser diodes. Coupling light power is on the rise after laser hammering correction, and the maximum coupling power can be up to 94%. Finite element method can be used to prove the reasonable predict of PWS direction. The results have a certain guiding significance on production of coaxial laser in laser welding.

**Key words:** laser technique; post-weld-shift; laser welding; finite element model; laser hammer

## 引言

与传统的焊接方法相比, 激光焊接具有功率密度大、热输入量热影响区小、重复性好焊接速度快、焊接应力和变形小等优点<sup>[1,2]</sup>, 已广泛应用于航天航空、船舶、汽车、光电子、医学等多个领域。Nd:YAG激光器的脉冲激光点焊传送到工件的热输入量最小, 操作方便且无需调整电极或消耗介质, 最适合光电子器件的封装焊接<sup>[3]</sup>。但脉冲激光点焊产生的焊后偏移(post-weld-shift, PWS)是影响半导体激光器光学与机械性能的主要因素, 几微米的焊后偏移就会引起50%甚至更多的耦合光功率的损耗<sup>[4]</sup>。国内外很多学者已对半导体激光器的焊后偏移进行了分析与讨论<sup>[5-9]</sup>, 但主

要研究是针对盒式封装激光器, 对3束激光焊接同轴型激光器的研究相对较少。2003年, CHEUNG等人研究了同轴型封装焊后偏移的动态特性, 对比了单光束与三光束焊接时PWS特征的异同, 结果表明, 单光束和三光束焊接时, PWS分别为 $5\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>。2005年, CHENG等人利用激光位移传感器实现了对PWS的实时测量与补偿并验证了其可行性<sup>[11]</sup>。2007年, CHUN等人提出了以耦合光功率值来判定同轴型激光器PWS方向的方法, 实现了单束激光补焊的定向热补偿, 结果表明, 同轴型激光器的对准精度可提高到 $0.5\mu\text{m}$ 内<sup>[12-13]</sup>。2010年, WU等人提出了用电阻应变式传感器在线测量PWS的方法, 该方法可判定PWS的大小与方向特征<sup>[14]</sup>。

目前的研究以单束或两束激光焊接居多, 且忽略了激光卸载后冷却过程。本文中选用光发射组件(transmitter optical sub-assembly, TOSA)为研究对象, 首先建立TOSA的3维有限元模型, 利用有限元热-结构耦合分析方法, 分析三光束焊接时PWS的特征, 同时进行激光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975293)

作者简介: 周晶晶(1990-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光电子器件封装制造理论和技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wuzhenghui@mail.csu.edu.cn

收稿日期: 2014-11-21; 收到修改稿日期: 2015-01-16

锤校正实验,研究焊点功率不均匀条件下 PWS 的方向,验证有限元仿真分析对 PWS 方向判断的正确性,为今后 TOSA 焊后偏移的研究提供理论基础。

## 1 有限元分析

### 1.1 有限元模型

根据同轴型光激光器的实际结构,其模型可简化为激光二极管 (laser diode, LD) 封装座和光纤一体化组件两部分,其中光纤一体化组件包括陶瓷插芯底座

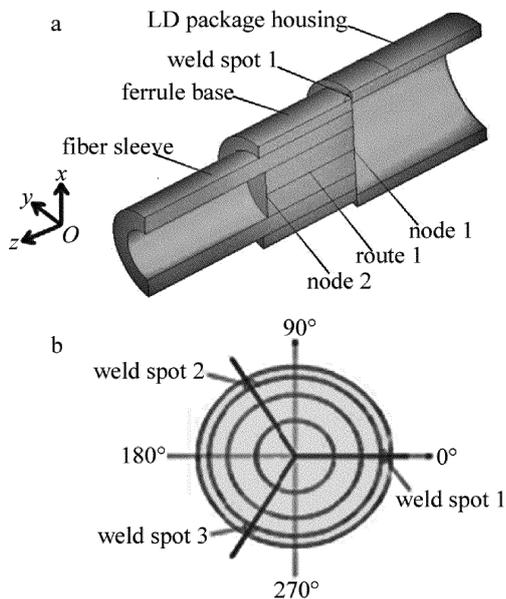


Fig. 1 3-D finite element model of TOSA

a—cutaway view of TOSA geometry model b—distribution of three weld spots

和套管,陶瓷插芯底座内置插芯和陶瓷插芯套管,由于插芯和陶瓷插芯套管的材料为氧化锆,其熔点和沸点高、强度高、热导率低、线膨胀系数较大且焊接热影响区较小,故在有限元仿真分析时,不考虑插芯和陶瓷插芯套管的影响。同轴型激光器有限元模型的剖视图如图 1a 所示,LD 封装座顶部中心为坐标原点,光轴方向为 z 方向;LD 封装座与套管采用 3 个焊点焊接,3 束激光间隔 120° 均匀分布,如图 1b 所示。

在有限元网格划分时选用 3 维网格,远离焊点区域采用尺寸较大的网格,以减小计算时间与分析成本,焊点处温度变化剧烈,且应力应变极高,采用加密的网格进行划分,以得到更精确的计算结果。网格划分后的有限元模型如图 2 所示。

Fig. 2 3-D mesh of finite element model for TOSA

### 1.2 材料属性

304 不锈钢焊接热变形、热裂纹倾向以及残余应力较小,激光焊接性能效果好<sup>[15]</sup>,因而本文中 choice 304 不锈钢作为焊接材料。由于材料热物理参量在高温时的缺省,本文中结合 KIM 等人的数据进行插值和拟合,得到了 304 不锈钢的热物理性能参量,如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

Table 1 Material properties

temperature/ K	specific heat/ (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	thermal conductivity/ (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	coefficient of thermal expansion/(m · K <sup>-1</sup> )	Young's modulus/ Pa	density/ (kg · m <sup>-3</sup> )	yield strength/ Pa	Poisson ratio
298	472	12	1.6549 × 10 <sup>-5</sup>	1.998 × 10 <sup>11</sup>	7911	2.287 × 10 <sup>8</sup>	0.29
673	535	23	1.8700 × 10 <sup>-5</sup>	1.559 × 10 <sup>11</sup>	7753	2.074 × 10 <sup>8</sup>	0.29
1073	603	35	2.1011 × 10 <sup>-5</sup>	0.713 × 10 <sup>11</sup>	7578	1.534 × 10 <sup>8</sup>	0.29
1670	729	45	2.1008 × 10 <sup>-5</sup>	0.042 × 10 <sup>11</sup>	7265	0.125 × 10 <sup>8</sup>	0.29
1708	754	48	2.1010 × 10 <sup>-5</sup>	0.010 × 10 <sup>11</sup>	7173	0.020 × 10 <sup>8</sup>	0.29
1873	754		2.1010 × 10 <sup>-5</sup>		6908		0.29
2973	754		2.1010 × 10 <sup>-5</sup>		6075		0.29

### 1.3 有限元耦合场分析

激光焊接是一个瞬态非线性的过程,在进行有限元分析前,假设温度场只受热输入方式和材料热物理性能参量的影响,忽略熔池内金属汽化的影响以及应力场的影响;假设材料是各向同性的,其热物理性能参量只随温度变化,与压力、时间等无关。本文中选用热-结构耦合方法对 PWS 进行有限元仿真,由于 Nd:YAG 激光焦点附近的激光束近似于高斯光束,故数值模拟时选用高斯函数分布的热源模型<sup>[17]</sup>。激光

焊接在室温环境下进行,LD 封装座被下夹具夹持固定,套管被上夹具夹持固定,因此在考虑边界条件和初始条件时,环境温度设为 20℃,LD 封装座 5mm 长度受全约束,套管的上端部内圆柱面受到径向约束,陶瓷插芯的上端面受到 z 向约束。热-结构耦合分析计算方程为<sup>[18]</sup>:

$$C_T \dot{T} + K_T T = Q \quad (1)$$

$$M \ddot{u} + Ku = F \quad (2)$$

式中,  $C_T$  为比热容矩阵,下标  $T$  为温度变量;  $T$  为节点

温度;  $\dot{T}$  为节点温度对时间的导数;  $K$  为结构刚度矩阵;  $K_T$  为热传导矩阵;  $Q$  为热负载;  $M$  为结构质量矩阵;  $\ddot{u}$  为节点加速度;  $u$  为节点位移;  $F$  为体载荷。有限元仿真时,先根据(1)式计算节点温度,然后把热分析的节点温度作为(2)式的体载荷进行结构分析。

## 2 有限元分析与结果

通过编写有限元热-结构耦合分析程序,采用高斯热源模型对 TOSA 激光焊接过程进行仿真分析,最终

Table 2 Power distribution of three weld spots

	laser power P/W		
weld spot 1	350	350	350
weld spot 2	250	300	300
weld spot 3	350	350	250

Table 3 Angle distribution of three weld spots

	location / (°)		
weld spot 1	0	0	0
weld spot 2	125	130	130
weld spot 3	240	240	230

得到 PWS 曲线。在有限元仿真过程中,定义节点 1 和节点 2 分别表示光纤头和光纤尾,取节点 1 到节点 2 之间的路径 1 观察 PWS 随距离变化的情况(见图 1a)。在焊接实验过程中,不能保证 3 个焊点功率完全相等、位置完全对称,本文中以焊点功率和焊点位置为参量分析 PWS,表 2 和表 3 中分别给出了 3 个焊点功率分布和位置分布情形,取激光束功率  $P = 350W$ ,脉宽  $5ms$ ,离焦量  $F = 1mm$ ,入射角度  $45^\circ$ ,冷却时间  $50s$ 。

焊点功率不均衡时,PWS 的仿真结果如图 3 所示,图中  $x, y$  和  $z$  分别表示为  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向上的 PWS。由图 3 可以看出,3 个焊点的脉冲功率不均衡程度越大,PWS 越大。 $z$  方向上的 PWS 为负,这是由于焊接过程中的热作用导致陶瓷插芯在光纤一体化组件的挤压下发生朝向 U 封装座的位移所致。从变化趋势上看,不管脉冲功率分布如何,PWS 随着离焊接结合面距离的增大而减小,最大 PWS 出现在节点 1 处,这是由于 TOSA 在节点 2 处受约束,因此越接近节点 2, PWS 越小,最终趋于 0。如图 3a 和图 3b 所示,当焊点 2 功率最小时,对于节点 1,有  $x < 0$  且  $y >$

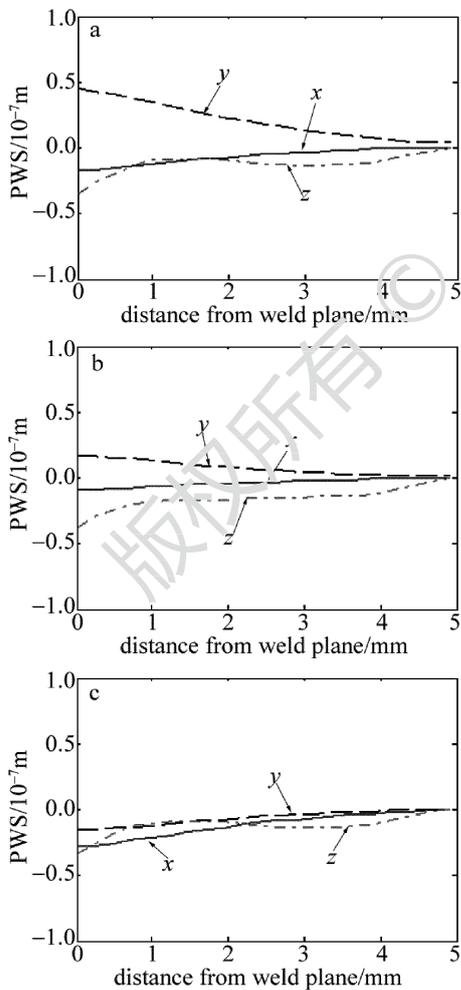


Fig. 3 PWS of unbalanced energy

a—350W;250W;350W b—350W;300W;350W c—350W;300W;250W

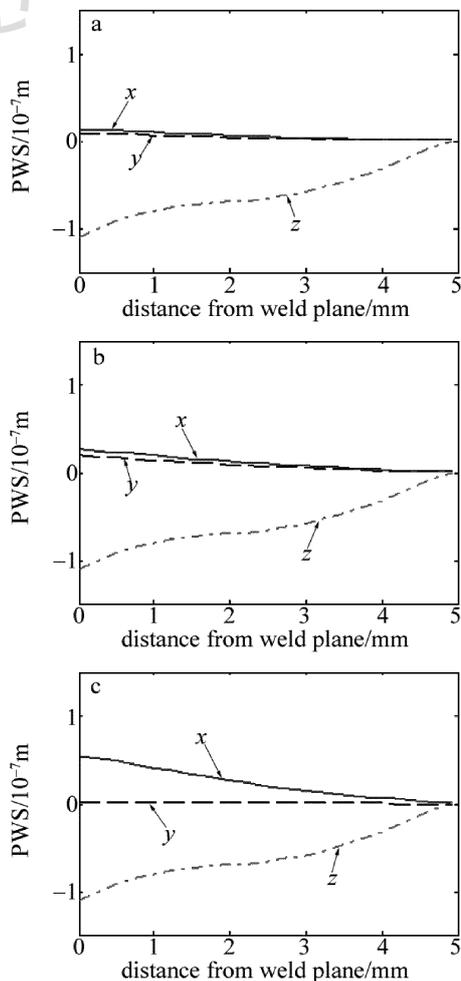


Fig. 4 PWS of asymmetric welding

a—125°;115°;120° b—130°;110°;120° c—130°;100°;130°

0, PWS 的方向朝向焊点 1 和焊点 3 功率的合成方向; 如图 3c 所示, 当焊点 3 功率小于焊点 1 和焊点 2 的功率时, 节点 1 处,  $x < 0$  且  $y < 0$ , PWS 的方向朝向焊点功率合成较大的方向。由此可知 3 个焊点功率不均衡时, PWS 的方向与 3 个焊点的功率有关, 总处于 3 个焊点功率合成较大的方向。

图 4 为 3 个焊点位置不对称时的 PWS 曲线图, 根据图 4 可知, 焊点位置不对称程度越高时, PWS 越大, 3 组实验中, 图 4c 的 PWS 最大。在图 4a 和图 4b 中, 保持焊点 1 和焊点 3 位置不变, 焊点 2 分别偏离  $120^\circ$  位置  $5^\circ$  和  $10^\circ$ , 焊点 2 偏移量越大,  $x$  方向和  $y$  方向 PWS 越大。在变化趋势上与焊点功率不均衡的结果一致, PWS 随着离焊接结合面距离的增大而减小。由于 3 个焊点的位置不对称, 造成焊接平面功率不相等, PWS 的方向总处于两焊点夹角较小的区域, 即 PWS 朝向焊点功率较大的区域。

### 3 实验

激光焊接系统光路图如图 5 所示, 由 Nd:YAG 激光焊接机、功率均分系统、激光光束传输光纤和激光输出模块等组成。

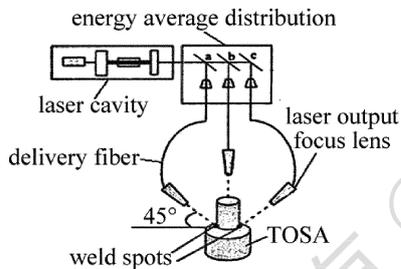


Fig. 5 Light-path diagram of laser welding

由于有限元仿真做了简化处理, 实验中得到的 PWS 与理论分析存在一定偏差, 因此本文中只针对 3 个焊点功率不均衡的情况分析 PWS 的方向。激光焊接实验过程中, 采用调整离焦量  $F$  的方法, 实现 3 束激光到达焊点的功率不相等。根据激光锤校正原理得到校正方向与 PWS 方向相差  $180^\circ$ , 基于有限元仿真分析结果, 焊点功率不均衡时 PWS 方向分析如表 4 所示。

Table 4 Analysis of PWS direction with unbalanced power of three laser beams

	situation		
	1	2	3
weld spot 1	$F = 0\text{mm}$	$F = 0\text{mm}$	$F = 1\text{mm}$
weld spot 2	$F = 1\text{mm}$	$F = 0\text{mm}$	$F = 0\text{mm}$
weld spot 3	$F = 0\text{mm}$	$F = 1\text{mm}$	$F = 0\text{mm}$
laser power	$P_1 = P_3 > P_2$	$P_1 = P_2 > P_3$	$P_2 = P_3 > P_1$
PWS direction predict	$300^\circ$	$60^\circ$	$180^\circ$
supplement location	$120^\circ$	$240^\circ$	$0^\circ$

示。取脉冲功率  $P = 300\text{W}$ 、脉冲宽度为  $5\text{ms}$  的激光锤进行校正, 实验结果如表 5 所示。

Table 5 Experiment results of laser hammering

situation	supplement location	coupling power before welding/mW	coupling power after welding/mW	coupling power after compensation/mW	coupling efficiency after welding/%	overall coupling efficiency/%
1	$120^\circ$	0.72	0.46	0.57	63.89	79.12
		0.68	0.52	0.60	76.47	88.24
		0.80	0.59	0.75	73.75	93.75
2	$240^\circ$	0.89	0.75	0.79	84.27	88.76
		0.58	0.42	0.47	72.41	81.03
		1.03	0.75	0.84	72.82	81.55
3	$0^\circ$	0.82	0.57	0.58	69.51	82.93
		0.91	0.79	0.85	86.81	93.41
		1.15	0.88	1.02	74.78	88.69

从表 5 可以看出, 激光锤校正可以减小 PWS 引起的耦合光功率的损失, 激光焊接后耦合光功率为  $64\% \sim 87\%$ , 经过激光锤校正后的耦合光功率为  $79\% \sim 94\%$ , 整体呈上升趋势, 因此, 有限元仿真分析关于 PWS 的方向预测合理。

### 4 结论

有限元仿真结果表明, 无论是焊点功率不均衡还是位置不对称, PWS 随着离焊接结合面距离的增大而减小; 焊点功率和位置越不平衡, PWS 越大; 焊点功率不均衡时, PWS 的方向总处于焊点功率合成较大的方向; 焊点位置不对称时, 焊接平面的功率分布由于焊点位置不对称而不平衡, PWS 方向处在两焊点夹角较小的区域, 即功率较大的区域。基于有限元仿真分析对 PWS 方向的预测, 进行了 3 束激光焊接实验, 并利用激光锤校正焊后偏移。实验结果表明, 经过激光锤校正后 TOSA 的耦合光功率整体呈上升趋势, 最大耦合光功率可提升到  $94\%$ , 验证了有限元仿真分析关于 PWS 方向预测的合理性。

### 参考文献

- [1] LIU X X, HUANG R, YAO G, et al. Numerical simulation of the temperature field of laser butt welding of titanium alloy sheet[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 700-704 (in Chinese).
- [2] ZHANG H G, JIN X Z, CHEN G Y, et al. Study on the burning loss of magnesium element in fiber laser welding aluminum alloy 5052 [J]. Laser Technology, 2012, 36(6): 713-718 (in Chinese).
- [3] WANG L B. The application and prospect of the laser package technology in Japan microelectronic and photonic [J]. OME Information, 2003, 20(5): 3-10 (in Chinese).
- [4] CHUN J, WU Y L, LI S Y, et al. The parabola approximation algorithm for alignment automation between a laser diode and a single-mode fiber [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(11): 1287-1290 (in Chinese).

- [5] LIN Y, LIU W, SHI F G. Laser welding induced alignment distortion in butterfly laser module packages: effect of welding sequence [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2002, 25(1): 73-78.
- [6] LIN Y, SHI F G. Minimization of welding-induced alignment distortion in butterfly laser module packages: a study of laser pulse shape [J]. Optical Engineering, 2007, 46(4): 044302.
- [7] LIN Y, GUO J, SHAPIRO A A, *et al.* WIAD minimization in butterfly laser module packages: clip design [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2007, 30(3): 499-505.
- [8] KUANG J H, HUNG T P. Laser hammering technique in butterfly laser diode module [C]// Electronic Packaging Technology Conference. New York, USA: IEEE, 2007: 874-881.
- [9] LIU Y D, SHEEN M T, HSU Y C, *et al.* Online post-weld shift measurement of butterfly-type laser module employing high-resolution capacitance displacement measurement system [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2010, 33(2): 91-97.
- [10] CHEUNG Y M, YIU C H. Transient characteristics of post-welding shift of TO-can pigtail package [C]//IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology. New York, USA: IEEE, 2003: 221-224.
- [11] CHENG W H, HU Y C, KUANG J H. Post-weld-shift compensation techniques in TO-can and butterfly types laser-welded laser module packages [C]// Lasers and Electro-Optics Society. New York, USA: IEEE, 2005: 505-506.
- [12] CHUN J, WU Y L, LI S Y, *et al.* Study of post weld shift direction thermal compensation in cylindrical LD packaging [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(8): 911-915 (in Chinese).
- [13] WU Y L, ZHANG A C, CHUN J, *et al.* Simulation and experimental study of laser hammering for laser diode packaging [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(1): 163-169.
- [14] WU Y L, YANG H T, LI S Y. Online measurement and correction of post-weld shift in laser welding packaging for laser diodes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(1): 135-142.
- [15] GUO L, WANG F, ZHANG Q M, *et al.* Research of techniques of laser-MIG hybrid welding of 304 stainless steel [J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 781-785 (in Chinese).
- [16] KIM K, LEE J, CHO H. Analysis of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 steel [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(11): 2253-2259.
- [17] ZHANG H C, HE B. Finite element analysis: ANSYS 13.0 from entry to actual practice [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 423-440 (in Chinese).
- [18] YIU C H, CHEN Y M. Finite element analysis on transient post-welding shift of cylindrical electronic pigtail package [C]//Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems. New York, USA: IEEE, 2005: 285-289.