

光子器件激光封装中热致角度偏移的降低

楼歆晔 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要 对光电子器件激光封装中光纤准直器的热致角度偏移进行了实验研究和理论分析. 设计了一种新型的拱形焊接支承架, 并对其热稳定性进行了测试. 测试结果表明, 在加载十个连续的温度循环周期后, 其角度偏移为 0.01° , 而在同样的测试条件下, 传统的鞍形支承架的角度偏移达到 0.023° . 采用非线性热—应力耦合有限元模型对封装结构中热应力的变化、残余应力的分布以及准直器角度偏移进行分析. 理论分析结果与实验结果极好地吻合. 进一步的理论计算得到新型拱形支承架的饱和热致角度偏移为 0.043° , 与传统鞍形支承架的 0.065° 相比得到了较大的降低.

关键词 光电子激光封装; 角度偏移; 焊接支承架; 有限元分析; 残余应力

中图分类号 TN203 **文献标识码** A

0 引言

在众多的光电子封装技术中, 激光熔焊技术由于其逸出气体少、热影响区域小、热变形小等优点被广泛使用^[1~3]. 然而, 激光熔焊所需解决的一大问题是如何减小焊后应力与焊后偏移. 焊接区域的快速冷却以及相应的材料收缩, 会导致器件中光部件的相对位置偏移. 这一焊致对准偏移(WIAD)会严重影响降低光耦合效率, 影响光器件的工作稳定性.

在微电子封装工业中, 温度循环测试被广泛用于加速热疲劳位移或断裂, 并以此为基础预测焊点的稳定性^[3,5]. 器件中相互连接的光组件具有不同的热膨胀系数和其它不同的材料特性, 例如, 泊松比、热传导率、屈服强度等. 由于热膨胀系数失配, 在组件中将产生不同大小的延伸和收缩. 焊致对准偏移最初由焊接装配元件中的残余剪切应力和弯曲应力造成. 在温度循环测试环境下, 热应力的变化会引起局部热屈服, 器件中的残余应力也将重新分布. 此外, 准直器间的对准偏移将随温度循环周期的增加而积累. 尽管对准偏移一般在微米量级, 然而由此造成的光功率损耗可能高达 50%. 因此, 如何减小最初的焊致对准偏移以及后来的准直器对准偏移, 对提高光电子器件的长期工作稳定性至关重要.

由角度失配引起的耦合损耗远大于由纵向间距或横向错位引起的损耗^[5]. 例如, 当角度偏移 $\theta = 0.075^\circ$ 时的耦合损耗为 3 dB, 与纵向间距 $s = 103$ mm 或横向错位 $d = 0.15$ mm 时的损耗相同. 由此说明了两光纤准直器间的耦合损耗主要是由两者的角度失配引起的. 这一结论对光纤直接耦合也同样适用^[6~8].

准直器对准偏移与众多因素有关, 主要有: 焊接激光参量, 焊接位置、焊点形态以及焊接工艺等^[4,6]. 目前, 国内外众多研究组对光电子封装激光熔焊工艺的研究均基于传统的鞍形焊接支承架. 然而, 传统的鞍形支承架热稳定性较差, 且其角度偏移对焊接过程中的很多影响因素极为敏感. 本文分析了焊接支承架形态对焊致对准偏移以及器件长期耦合效率的影响. 对不同的焊接支承架在温度循环下造成的准直器对准偏移分别进行了实验测量和有限元计算(FEM), 旨在了解评估光电子器件封装潜在的热致角度偏移, 对减小光电子器件封装中的准直器对准偏移, 设计制造高可靠性的光电子器件具有重要意义.

1 封装结构与实验方法

1.1 封装结构

在一个同时适用于自动控制和传统装配的通用封装结构中, 金属镀层光纤或光纤准直器需通过自动夹具从上方插入焊接支承架中, 并且需保证它能绕夹持点在 yaw 和 pitch 方向上转动, 因而能够优化光能输出. 这就要求支承架的结构必须包含一向上的空隙. 图 1 表示了典型光纤耦合光电子器件中基于激光熔焊的封装结构, 并着重突出了传统鞍形支承架与拱形支承架的结构差异. 光纤耦合器件的主要构成元件包括两单模尾纤或 GRIN-Lens 光纤准直器, 它们被精确定位并通过焊接支承架固定于基板上. 对鞍形支承架和新设计的拱形支承架在温度循环条件中的温度特性进行了实验测试和理论模拟. 实验装置包括小型光纤准直器(直径 1.2 mm), 其套圈材料为镀金的 SS304, SS304 焊接支承架以及测试基板. 封装时, 先将支承架与基板之间焊接固定, 然后再将支承架与准直器之间焊接固定. 为

达到对角度的精确测量,在基板侧面焊上一镀金反射镜,用一束经这一反射镜反射的 He-Ne 激光束作为基准. 在温度循环测试中,采用一角度仪测量准直器输出光束相对于基准光束的角度偏移,角度仪的分辨率为 1 弧秒.

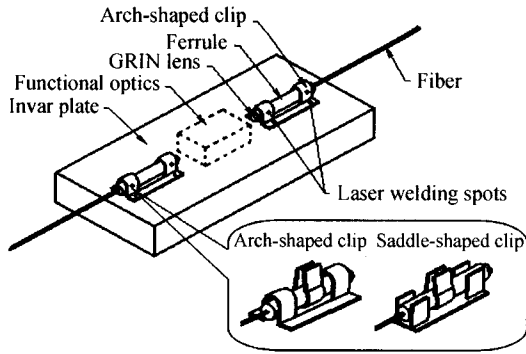


图 1 光纤准直器通过焊接支承架固定于光器件中
Fig. 1 Schematic chart of fiber collimator fastened in optical devices using weld clip

1.2 激光熔焊过程

用于光电子封装的三光束激光熔焊机由光功率约为 100 W 的长脉冲(100 ms)Nd:YAG 激光器和激光传输系统组成. 激光器的输出光束被等分成三个不同方向上的聚焦光束,并精确聚焦于待焊点上. 当光耦合达到最大值时,先将支承架与基板之间焊接固定,再将支承架与准直器之间焊接固定. 支承架与基板间的固定通过四个焊点实现,焊点在支承架的下表面同时施加水平和垂直约束. 激光熔焊时,脉冲激光能量使焊接区域的材料熔化,两焊接材料之间仅存在非渗透约束^[7]. 焊点在之后的冷却过程中形成.

1.3 温度循环测试

根据 B. Z. Hong et al^[10] 的研究,初始零应力参考温度的选择对于温度范围在 -55℃~125℃ 中的热应力和相应的累积应变无明显影响. 因而假设当温度为 20℃ 时,整个封装结构处于零应力状态. 循环温度载荷如图 2,温度范围 20℃~90℃,频率 3 hr⁻¹,温度变化率 >10℃/min,高低温度持续时间

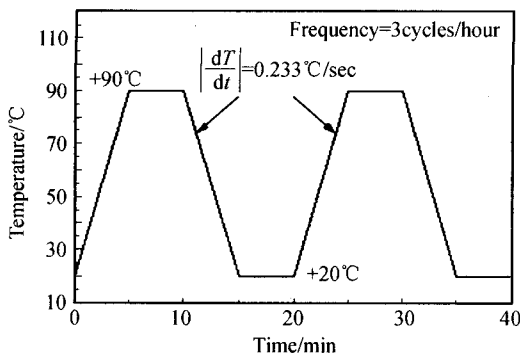


图 2 温度循环测试中 20℃~90℃ 的温度载荷
Fig. 2 Temperature cycling test from 20℃ to 90℃

>7 min.

2 实验及结果

2.1 实验过程

支承架制作采用数字雕刻机在 SS304 材料薄片上雕刻,并通过成型和表面修磨得到. 然后按前述的激光熔焊过程将支承架装配于基板上,接着完成支承架与准直器间焊接固定.

在激光熔焊过程中,将作用于两不同支承架的激光参量、激光束入射角、激光束能量平衡度等参量控制恒定. 因此,耦合损耗随温度试验的不同极大程度上是由于支承架的结构差异造成,因为支承架的结构直接影响了热应力和焊后残余应力的大小和分布. 在测试过程中,采用温度控制器控制环境温度在 20℃~90℃ 范围内变化. 在一个温度周期内等间隔地对准直器的角度偏移采样 12 次.

2.2 实验结果

分别采用鞍形支承架和新型拱形支承架的封装结构在温度循环条件下的测试结果如图 3 和图 4. 从图可知,准直器的角度偏移随温度循环数的增加而逐渐积累,且两支承架的偏移量之间存在明显的

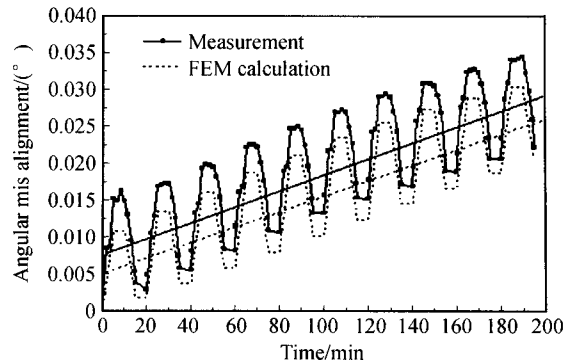


图 3 鞍形支承架封装结构中光纤准直器角度偏移的测量与理论计算

Fig. 3 Measured and calculated beam angular shift of a saddle-shaped weld clip as a function of cycling times

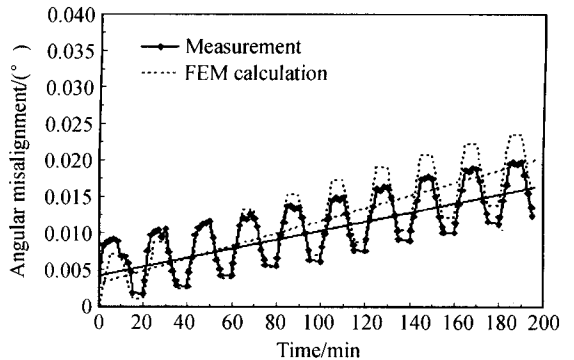


图 4 拱形支承架封装结构中光纤准直器角度偏移的测量与理论计算

Fig. 4 Measured and calculated beam angular shift of an arch-shaped weld clip as a function of cycling times

差异. 准直器角度的永久偏移来自于积累的温度屈服, 以及支承架和准直器中残余应力的重新分布. 而在一个温度周期内, 角度偏移的变化趋势与环境温度的变化趋势类似, 这主要体现了支承架与准直器之间随温度变化的组合弹性形变方式.

从图 3、4 可见, 当采用传统的鞍形支承架时, 10 个温度循环周期之后的累积准直器角度偏移达到了 0.023° ; 而当采用新型拱形支承架, 其相应的数值仅为 0.01° . 拱形支承架相对于鞍形支承架的小偏移是由于拱形支承架两侧的定位片相互连接, 有助于平衡积累的应力, 提高稳定性.

3 有限元分析

3.1 有限元模型

采用通用有限元分析软件 ANSYS 模拟分析温度循环测试下封装结构的热应力变化、残余应力分布以及光纤准直器的角度偏移. 分析采用热-应力直接耦合模型, 并且为了使分析结果更精确, 假设各材料属性与温度有关. 光纤准直器的套圈、自聚焦透镜和光纤的直径分别为 1.4 mm , 1.0 mm 和 0.125 mm . 有限元分析模型的网格划分如图 5. 鞍形支承架封装结构的网格划分模型包含 1542 个耦合单元和 1669 个节点, 拱形支承架封装结构的模型包含 2047 个耦合单元和 2280 个节点. 由于在激光熔焊的过程中, 材料熔化并快速冷却的焊接区域的应力密度大于其它区域, 因此在焊接区域及其附近进行网格细化.

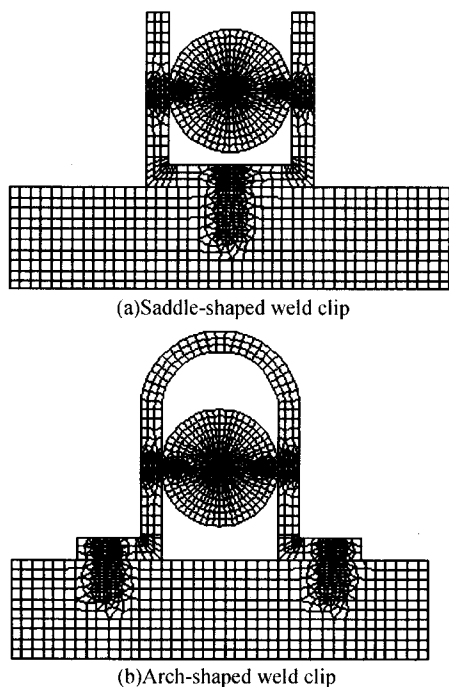


图 5 封装结构的网格划分模型
Fig. 5 Finite element mesh setup for modeling

3.2 材料属性

Invar 基板和支承架的材料采用 Invar 合金钢, 准直器的粘接剂为 353ND, 套圈材料为 SS 304, 材料属性见表 1^[11]. 模型假定材料的机械属性和热属性均与温度有关, 并且各向同性. 与温度有关的材料属性包括: 杨氏模量、屈服强度、热膨胀系数和热导率. 由于缺少 353ND 光纤粘接剂的部分机械属性, 以另一种粘接剂 Sn(63)/Pb(37) 的这些机械属性代替, 考虑到 353ND 的厚度只有 $20\ \mu\text{m}$, 这一近似对模拟结果影响甚微.

表 1 有限元模型的材料属性

材料	Invar	SS304	353ND	光纤
杨氏模量/GPa	141	193	32	69
屈服强度/Mpa	275.6	205	34.43	110
泊松比	0.3	0.3	0.4	0.191
热膨胀系数/ $(\mu\text{m} \cdot \text{mK}^{-1})$	1.4	17	54	0.55
热导率/ $(\text{W} \cdot \text{mK}^{-1})$	16.4	15.1	0.34	1.5
比热/ $(\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C})$	258.6	500	128	745
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8080	800	1020	2190

3.3 边界条件和初始条件

由于实验过程中 Invar 基板的下表面固定, 因此将下表面上的节点施加垂直方向上的位移约束. 并且作为基准点, 在基板下表面最左端边线上的节点同时施加水平方向上的位移约束. 为模拟由激光熔焊造成的残余应力, 假设焊接区域的温度值在 5 ms 内从环境温度 20°C 升高至 1600°C , 并假设此区域通过与空气的自由对流自然冷却凝固. 在熔焊过程的模拟中假设支承架和准直器套圈之间遵循材料非渗透约束^[9]. 将计算得到的焊后残余应力和结构的焊后变形作为初始条件加载于后续的温度循环模拟中.

3.4 FEA 的计算理论

在分析温度循环测试条件下封装结构的偏移响应时, 计算包括有限塑性应变在内的有限形变. 根据非线性应变-位移的定义^[9]

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}) \quad (1)$$

式中, ϵ_{ij} 为应变张量, u_i 为位移矢量.

在热-应力耦合分析中, 总应变包括弹性应变、塑性应变和由温度产生的热应变^[10], 即

$$\epsilon_{ij}^{\text{Tot}} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^T \quad (2)$$

弹性响应通过 Duhamel-Neumann 定律^[9] 获得. 弹性应变的简单表示形式为

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E}\delta_{ij}\sigma_{kk} \quad (3)$$

式中, E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_{ij} 为 Cauchy 应力张量, δ_{ij} 为 Kronecker delta 函数. 应力张量能如

下的平衡方程中得到

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \text{ with } \sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (4)$$

式中, ρ , b_i 和 $\sigma_{ij,j}$ 分别是材料密度, 质量力和应力张量的导数.

为计算塑性应变, 采用 Von Mises 材料的应力-应变方程以及混合硬化定律^[12], 即

$$f(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}, K) = \frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} - \sigma_e^2(\epsilon_p) = 0 \quad (5)$$

式中, σ_{ij} , K , S_{ij} , ϵ_p , σ_e 分别是应力张量, 硬化系数, 偏应力张量, 有效塑性应变和有效应力.

由热膨胀引起的热应变定义为^[10]

$$\epsilon_{ij}^T = \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (6)$$

式中, α , ΔT , δ_{ij} 分别为热膨胀系数, 温度差和 Kronecker delta 函数.

式(1)~(6)中光器件的温度 T 由热传导方程给出^[13]

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - Q \quad (7)$$

并附加热传导方程的第三类边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_s) \quad (8)$$

式中, k , C , ρ , Q , h , n 和 T_s 分别为热传导率, 比热, 密度, 热源强度, 换热系数, 垂直于热交换界面的单位矢量和温度.

根据式(1)~(8), 并采用通用有限元分析软件 ANSYS, 计算得到残余应力和热应力分布, 以及光纤准直器的偏移量.

3.5 有限元分析结果

通过有限元分析法得到的前十个温度测试循环中光纤准直器的角度偏移量如图 3 和图 4. 可见, 这一角度偏移量随温度循环的增加而增加. 经历十个温度循环之后, 采用鞍形支承架定位的准直器角度偏移累积至 0.02° ; 然而从图 4 可知, 当使用拱形支承架时角度偏移明显地小于前者, 为 0.013° . 另外, 计算得到的角度偏移的变化趋势与实验结果较好地吻合. 这说明了有限元分析能作为了解热致形变机理, 评估封装工艺的有效方法.

计算得到的光纤准直器角度偏移随温度循环的变化曲线如图 6. 从图中可见, 在经历 60 个温度循环之后, 两光纤准直器的角度偏移均趋于稳定. 鞍形和拱形支承架的饱和角度偏移分别为 0.065° 和 0.043° , 这说明了在温度循环测试下, 采用拱形支承架能减少高达 50% 的角度偏移.

图 7 表示温度循环过程中封装结构的最大 Von Mises 应力. 此最大的等效残余应力出现在激光焊点及其周围的区域. 计算结果显示最大残余应力分

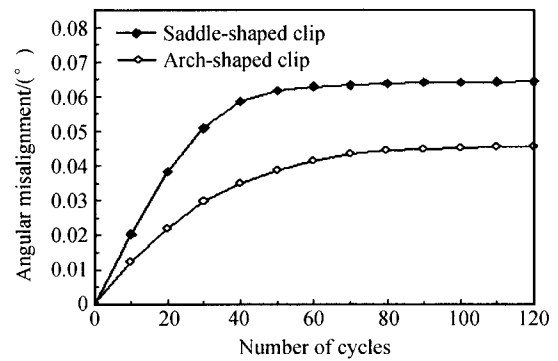


图 6 两种支承结构中光纤准直器角度偏移随温度循环的变化

Fig. 6 Calculated angular shift as a function of the cycle number for two types of weld clips

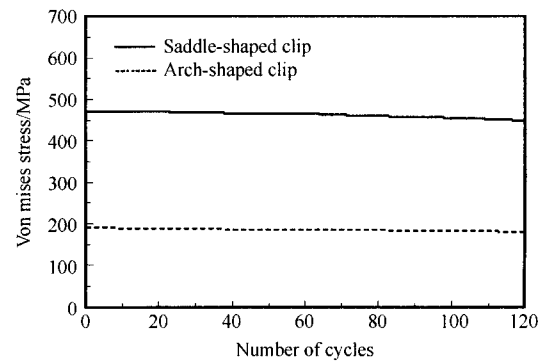


图 7 封装结构中最大 Von Mises 应力随温度循环的变化
Fig. 7 Calculated maximum von mises stress in packaging components as a function of the cycle number

别达到了 470 MPa(鞍形支承架)和 192 MPa(拱形支承架). 从而, 使用拱形支承架时能显著地减小封装器件所受应力. 光纤准直器的角度偏移主要由局部热应力的变化以及残余应力的重新分布引起. 因此, 较低的应力密度使相应的角度偏移较小.

4 结论

本文通过实验和有限元分析法研究了基于激光熔焊技术的光纤/光纤准直器定位的热机械稳定性. 提出了一种新型的拱形支承架, 并且通过实验和理论分析证明在温度循环测试中, 拱形支承架的热稳定性明显优于传统的鞍形支承架. 采用通用的有限元分析软件 ANSYS 对由于积累的热应力和残余应力导致的角度偏移进行了分析, 当在有限元模型中考虑焊接冷凝时的热应力和残余应力时, 分析结果与实验测量结果很好地吻合. 本文的研究有助于理解光器件中角度偏移的形成机制, 预测光器件在温度循环应力下的耦合稳定性. 此外, 提出的减小光无源器件封装角度偏移的方法有助于制作高可靠性、高性能的光器件或模块. 本研究的结论如下:

1) 在 60 个温度循环后, 采用鞍形和拱形支承架

定位的准直器角度偏移将分别达到 0.065° 和 0.043° . 这说明了新型的拱形支承架能够提高光器件的长期工作稳定性.

2) 造成角度偏移的主要因素是在焊接冷凝过程中残余应力的重新分布和由温度变化引起的热应力. 支承架的结构特性决定了拱形支承架引入的应力小于鞍形支承架的应力.

3) 有限元分析作为一个有效的评估和设计工具可用于预测和减小光电子封装的对准偏移. 在有限元模型中更改封装结构十分容易, 具有极大的通用性.

参考文献

- 1 Rajiv R, Kumar N S. Optical Networks. San Francisco: Morgan Kaufmann Pub, 2003. 112~135
- 2 田燕宁, 方强, 王永昌, 等. 双尾纤式多功能光隔离器研究. 光子学报, 2005, **34**(2): 230~232
Tian Y N, Fang Q, Wang Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 230~232
- 3 Hsieh C S, Chen J M, Hsu J M. Effect of temperature cycling on angular alignment in Add/Drop filter-module packaging. *Journal of Electronic Material*, 2003, **32**(3): 137~141
- 4 Soon J. Packaging of photonic devices using laser welding. *Proceedings of SPIE*, 1996, **2610**: 138~149
- 5 Cemal B, Rumpa C. Finite element simulation of the temperature cycling tests. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1997, **20**(4): 530~536
- 6 Ammon Y. Optical Electronics in Modern Communications. New York: Oxford University Press, 1997. 50~63
- 7 徐庆扬, 陈少武. 半导体激光器与光纤光栅对接耦合研究. 光子学报, 2005, **34**(1): 1~5
Xu Q Y, Chen S W. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 1~5
- 8 薛春荣, 祝生祥, 肖志刚. 锥形光纤间的耦合特性. 光子学报, 2004, **33**(7): 803~805
Xue C R, Zhu S X, Xiao Z G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 803~805
- 9 Wenning L, Yaomin L, Frank G S. Welding Induced Alignment Distortion in DIP LD Packages; Effect of Laser Welding Sequence. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4625**: 128~135
- 10 Bor Z H, Lloyd G B. Nonlinear finite element simulation of thermoviscoplastic deformation of C4 solder joints in high density packaging under thermal cycling. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 1995, **18**(3): 585~591
- 11 Boyer H E, Gall T L. Metals Handbook Desk Edition. Detroit: ASM International, 1999. 66~68
- 12 Yaomin L, Frank G S. Effect of welding sequence on laser welding induced alignment distortion in butterfly laser diode module packages. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4997**: 30~39
- 13 Chen W H, Sheen M T, Chien C P. Reduction of fiber alignment shifts in semiconductor laser module packaging. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(6): 842~847

Thermally Induced Misalignment in Laser Packaging of Optical Modules

Lou Xinye, Wu Xingkun

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Department of Optical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2005-07-24

Abstract The thermally-induced misalignment of fiber collimators in laser packaging of optical module under accelerated temperature cycle testing has been studied both experimentally and numerically. Two types of laser welding clips for fiber/fiber collimator, the saddle-shaped and the arch-shaped were employed in the testing. Experimental results showed that the fiber angular misalignment when using saddle-shaped clip is up to 0.023° after undergoing 10 temperature cycles, whereas the misalignment of arch-shaped is 0.01° , about two times less than that of the saddle-shaped. A nonlinear thermal-elasticity coupled finite-element analysis (FEA) has also been utilized to analyze the properties of residual stresses and consequent angular misalignment of collimators. Experimental measurements of the collimator angular misalignment were in a good agreement with the FEA calculated results. The saturated thermally induced angular shift was calculated to be 0.043° for arch-shaped clip in comparison with 0.065° for saddle-shaped clip, and Von Mises stresses were also presented for the both kinds of clips. It was concluded that arch-shaped clip exhibits a 50% higher thermal stability in optical module packaging.

Keywords Opto-electronic laser packaging; Angular shift; Weld mount; Finite-element method; Residual stresses



Lou Xinye was born in 1983 in Zhejiang Province. She received B. S. degree in department of optical engineering in Zhejiang University. She is currently pursuing M. S. degree in Zhejiang University. Her major interest is the opto-electronic packaging.