

文章编号:1004-4213(2010)04-0643-5

基于有限元的平面光波导粘接热应力分析*

徐洲龙, 郑煜

(中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 长沙, 410083)

摘要:基于有限元理论对阵列光纤和波导芯片粘接情况进行了建模与仿真,分析了在温度变化下不同粘接区域厚度的热应力和微位移的产生和分布,结果表明粘接界面的边缘区域对温度变化最敏感.根据光弹效应定性分析了粘接区域的应力双折射,并利用光束传播法计算了由此微位移所导致的光功率损耗,结果表明若以附加损耗小于 0.15 dB 的标准考察,则必须要求粘胶厚度的理论值在 16 μm 以内.总结了温度变化和在相同条件下不同粘胶厚度对平面光波导封装性能的影响规律.

关键词:有限元;平面光波导;光弹效应;光束传播法

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103904.0643

0 引言

集成光子器件的封装在其总成本中占有很大的比重,因此要求低成本、高效率和高质量的对准和封装成为集成光子芯片发展的必然挑战^[1-4].现在最常用、最有优势的平面光波导的封装方法是通过一种称之为 UV 胶的有机体将其粘接在一起^[5-6],UV 胶是一种由多种有机物组成的对紫外光十分敏感的混合物.在紫外光的照射下,胶体能在几分钟内完成固化过程,并且将阵列光纤和波导芯片牢牢的粘接在一起.在理想情况下,集成光子芯片对准和封装是零误差的,但是封装完毕的器件必然在应用环境中面临着诸如拉伸、扭转、弯曲、挤压以及湿度、温度变化等外界干扰,这些客观环境的干扰必然会对集成光子芯片的封装性能产生影响^[7-8],甚至直接导致其破坏,因此有必要对封装的可靠性进行研究.

国内外现有的研究方法主要是通过可靠性实验^[7-9]来考察同一条件下封装工艺的好坏,即随机选择同一工艺下的一批封装好的器件进行可靠性测试,这些测试包括高温高湿实验、机械冲击与震动实验、高低温储存实验,温度循环实验等等,通过这些测试来估计同一工艺下器件封装的寿命和损耗.然而这些可靠性试验费用高、测试时间长,必须使用特殊的实验仪器对大量的器件进行破坏性测试,而且无法对具体某个环境因素对器件封装性能的影响机

理进行深入的解释.为进一步深入研究温度变化对固化后集成光子器件粘接性能的影响机理,本文基于有限元理论,对阵列光纤和波导芯片粘接进行了建模与仿真,分析了在温度变化下不同粘接区域厚度的热应力和微位移的产生和分布;并在此分析结果的基础上利用光弹效应和光束传播法对由应力导致的双折射效应和由微位移导致的光功率损耗进行了讨论.

1 热应力的有限元理论

温度产生的热应变可以通过式(1)来计算

$$\frac{\partial \epsilon^{\text{th}}}{\partial T} = \alpha(T) \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$\alpha(T)$ 是随温度变化的热膨胀系数, T 是温度.

弹性应变可以表示为总应变减去由热产生的应变,矩阵形式为

$$\{\epsilon\}^{\text{el}} = \{\epsilon\} - \{\epsilon\}^{\text{th}} \quad (2)$$

线弹性材料下,应力可以通过胡克定律来计算

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}^{\text{el}} \quad (3)$$

2 建模与加载

建模使用现在最常见的粘接界面与垂直轴面呈倾斜角度 8° 的平面波导耦合模型,由于粘接区域的厚度在微米级,而且主要研究温度对粘接区域的影响,所以在保证一定的精度的前提下,为方便建模和计算,建模缩短了光器件的长度,并假设粘接界面为理想粘接情况,忽略由于粘胶微米厚度而存在的尺寸效应.由于不同粘胶的厚度模型的热应力分析结果中的应力分布情况和产生的位移趋势十分类似(通过仿真已经验证),因此本文先对粘胶厚度为

*国家自然科学基金重点项目(50735007)和国家高技术研究发展计划(2007AA04Z344)资助

Tel:0731-8836858 Email:zhengyu@mail.csu.edu.cn

收稿日期:2009-06-18

修回日期:2009-08-28

40 μm 的模型进行建模分析和讨论,然后再分别对粘胶厚度为 10 μm 、15 μm 、20 μm 、30 μm 、40 μm 的模型进行同样条件下的热应力分析,最后对各个模型的结果进行对比和讨论。

仿真使用的模型材料参量和划分粘胶厚度为 40 μm 模型的网格及其参考坐标如下表 1 和图 1。

表 1 材料属性参量

Table 1 Thermo-mechanical properties of adhesive joint materials

Material	Property	$E(\text{MPa})$	ν	$\alpha/(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
UV curing glue		635	0.38	In Eq. (5)
Waveguide chip		5.76×10^4	0.17	0.54
Array fiber		5.76×10^4	0.17	0.54

$$\alpha = \begin{cases} 62 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} & T_g < 72 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 215 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} & T_g \geq 72 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

式中 T_g 是 UV 固化胶的玻璃化温度。

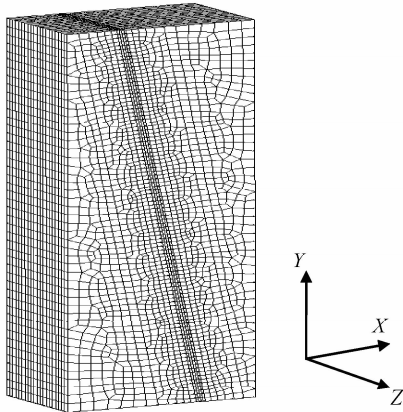


图 1 40 μm 模型的网格划分
Fig. 1 Meshed elements of 40 μm model

因为主要目的是进行平面光波导粘接的热应力分析,所以对模型的边界条件设定为:温度从 $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 升温到 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, 均匀分布,总加载时间为 1 个单位时间。

3 分析结果

对于胶体厚度为 40 μm 的模型,仿真分析得到如图 2 的 Von mises 应力分布图,从图中可以看出粘接区域是热应力发生的主要区域,相比起来,由于平面波导的热膨胀系数比较小,其产生的热应力也十分的小,约为 0.01 MPa;而最大的 Von mises 应力出现在粘接界面的上斜角处的应力集中点(如图 2 中黑圈内),其最大值约为 18.49 MPa,这是光波导和胶体热膨胀程度不同与斜 8° 角的芯片粘接界面综合导致的结果。

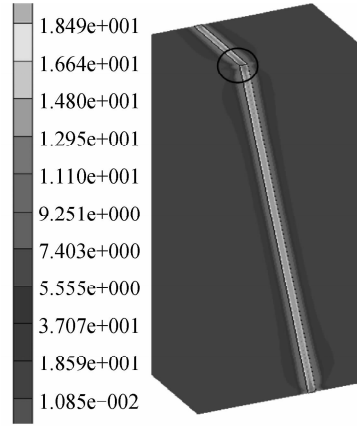


图 2 100 $^\circ\text{C}$ 时 40 μm 模型的 Von mises 应力分布
Fig. 2 Von mises stress distribution of 40 μm model at temperature 100 $^\circ\text{C}$

图 3 是胶体粘接区域的 Von mises 应力分布图,从图中可以看出粘接界面的应力分布规律,粘接区域内部大部分区域的应力分布基本均匀,而在粘接界面边缘处出现应力陡增,说明了粘接界面边缘区域对温度变化的敏感性。

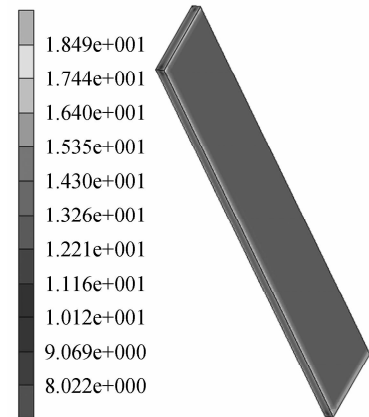


图 3 100 $^\circ\text{C}$ 时 40 μm 模型粘接的 Von mises 应力分布
Fig. 3 Von mises stress distribution of 40 μm model's adhesive at temperature 100 $^\circ\text{C}$

图 4 是 40 μm 模型粘接区域产生的微位移历

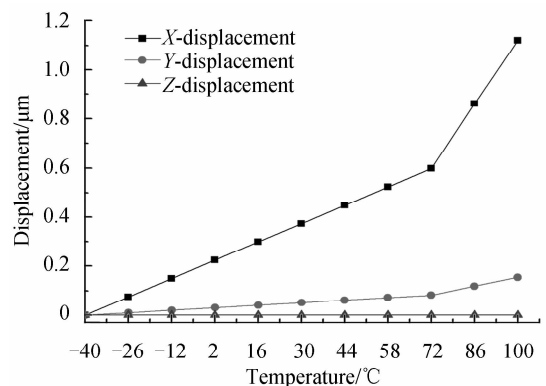


图 4 40 μm 模型粘接位移随温度变化的曲线
Fig. 4 Adhesive displacements with respect to the temperature changes

史曲线,伴随着加载温度的循环变化,各轴向位移的曲线也在循环变化,在胶体的玻璃化温度 $T_g = 72\text{ }^\circ\text{C}$ 时由于热膨胀系数发生突变,则各轴向位移也发生突变;同时在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, X 轴轴向最大位移为 $1.12\text{ }\mu\text{m}$, Y 轴轴向最大位移为 $0.154\text{ }\mu\text{m}$, Z 轴轴向最大位移为 $9.746 \times 10^{-5}\text{ }\mu\text{m}$, 这个值相对比较小,基本上可以忽略不计。

图 5 是改变粘接区域固化胶的厚度,分别对 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 进行建模,并在同等条件下进行分析和计算,得到其在集中应力点处的 Von mises 应力值(也是应力的最大值)曲线,从曲线中可以看出,厚度越小应力集中点处的应力值就越小。

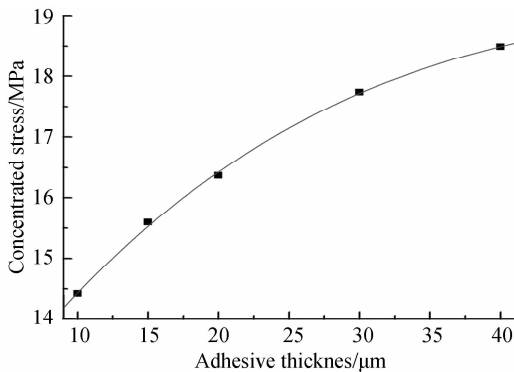


图 5 温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时粘接区产生的集中应力
Fig. 5 Concentrated stress at temperature $100\text{ }^\circ\text{C}$ with respect to adhesive thickness

图 6 是温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的状态下,取粘接区域内光路上某一点的 Y 轴轴向主应力和 Z 轴轴向主应力之差随厚度变化的曲线,从图中可以看出,厚度越小,其 $\sigma_y - \sigma_z$ 值反而越大,但最大值和最小值之差只有 0.01 MPa 。

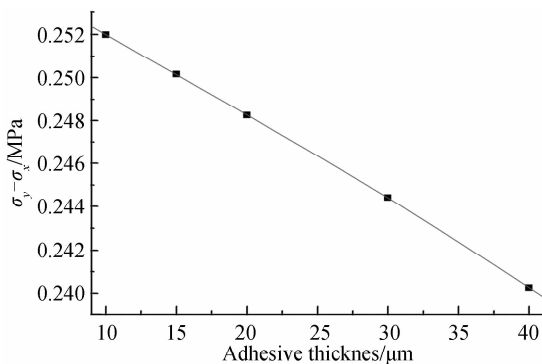


图 6 温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时粘接区域产生的 $\sigma_y - \sigma_z$
Fig. 6 $\sigma_y - \sigma_z$ at temperature $100\text{ }^\circ\text{C}$ with respect to the adhesive thickness

图 7 是温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的状态下各个轴向的位移随厚度变化的曲线,从曲线上可以看出厚度越小,各个轴向的位移的就越小;同时, Z 轴轴向产生的位移最小,基本上在 $10^{-5}\text{ }\mu\text{m}$ 数量级以内,可忽略不计。

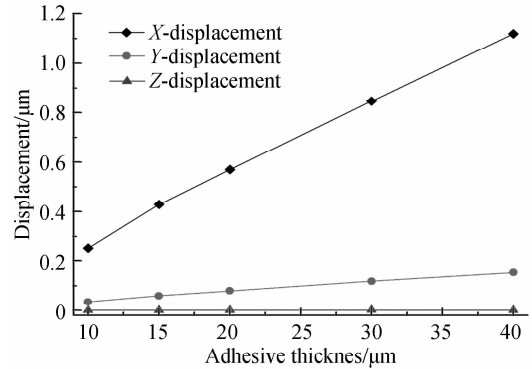


图 7 温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时粘接区域产生的位移
Fig. 7 Adhesive shifts at temperature $100\text{ }^\circ\text{C}$ with respect to the adhesive thickness

4 结果讨论

4.1 应力引起的双折射效应

当透明的各向同性固体介质受到机械应力作用时,其折射率特性会发生改变,该介质会变成光学各向异性介质,这种现象被称为应力双折射,也称为光弹效应^[10-11].光弹效应说明了折射率与应力之间存在一定的关系,即应力-光性定律,如式(6)

$$\begin{aligned} N_x - N_y &= C(\sigma_x - \sigma_y) \\ N_x - N_z &= C(\sigma_x - \sigma_z) \\ N_y - N_z &= C(\sigma_y - \sigma_z) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_x 、 σ_y 和 σ_z 分别是沿 OX 、 OY 和 OZ 轴轴向的主应力, N_x 、 N_y 和 N_z 分别是沿 OX 、 OY 和 OZ 轴轴向的主折射率, $C = C_1 - C_2$ 为材料的相对应力光弹系数。

从式(6)和图 6 可以定性比较上述不同粘胶厚度模型产生的双折射,很明显可以得到,粘接区域的厚度越小, $\sigma_y - \sigma_z$ 的值越大,产生的双折射 $B = N_y - N_z$ 也越大,但是,考虑到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的模型的 $\sigma_y - \sigma_z$ 之值仅相差约 0.01 MPa ,而应力光弹系数 C 一般在 10^{-12} 数量级,那么可以得到上述不同模型的双折射不会有太大的差别;而从图 5 在温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下粘接区域产生的集中应力图则可以得到:如果要求粘接区域的集中应力越小越好,则粘胶厚度小的模型更具优势。

4.2 位移产生的光功率损耗

光束传播算法 (Beam Propagation Method, BPM) 是近似求解单色波波动方程的方法,用来研究在轴向变化波导中的线性和非线性光束传输现象,在集成光波导器件设计中有着广泛的应用.其基本原理就是把波导沿着传播方向划分成若干截面,根据前一个或几个截面上的已知场得到下一个截面的场分布. BPM 的理论基础是 Helmholtz 方程.由于 Helmholtz 方程是频域方程,方程可以解出在某

一频率下的稳态解,这一求解过程形象地反映场在波导中的传播与变化情况. Helmholtz 方程标量形式^[12-13]见式(7)

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \Psi = 0 \quad (7)$$

式中,对于 z 为波传播方向, ω 为光的角频率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空的波数, n 是材料的折射率分布, Ψ 是电场或磁场分量进行时空分离后的空间部分, 设 $\Psi = E \times \exp(-in_c k_0 z)$, 其中 n_c 为有效折射率, 代入 Helmholtz 方程, 经推导可得到光束传播法傍轴 FD-BPM 的求解公式

$$-E_{s+1}^n + aE_s^n - E_{s-1}^n = E_{s+1}^{n+1} + bE_s^{n+1} + E_{s-1}^{n+1} \quad (8)$$

式中

$$a = 2 - (\Delta x)^2 [(n_s^{n+1})^2 - n_c^2] k_0^2 + \frac{4}{\Delta z} (\Delta x)^2 i k_0 n_c;$$

$$b = -2 + (\Delta x)^2 [(n_s^n)^2 - n_c^2] k_0^2 + \frac{4}{\Delta z} (\Delta x)^2 i k_0 n_c.$$

另外,一般以光功率损耗来代替光耦合效率,其公式为

$$\eta = -10 \log(P_{out}/P_{in}) \quad (9)$$

本文基于光束传播法,分别对温度在 -40°C 和 100°C 下不同粘胶厚度模型进行光学仿真,并计算其光功率损耗. 仿真使用的材料光学参量见表 2, 因 Z 轴向位移太小,可忽略不计,所以仅考虑 X 轴向和 Y 轴向的位移. 计算得到的损耗如图 8.

表 2 各个材料的光学属性

Table 2 Optical properties of materials

Material	Property	Refractive index
Array fiber		1.454
Waveguide chip		1.454
Coating and substrate		1.444
Depth of glue		1.454

从图 8 可以得到,随着粘胶厚度的增加,光功率损耗也在增大,而且增大的幅度也在变大;在温度 100°C 的状态下,由于粘胶厚度越大,热膨胀产生的各个轴向的微位移也越大,所以由热膨胀导致的光

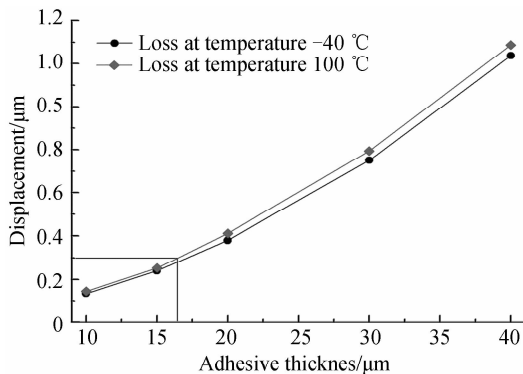


图 8 热膨胀前后的光功率损耗比较

Fig. 8 Optical power loss at temperature -40°C and 100°C

功率损耗增量也在变大. 具体的,不同胶体厚度模型由热膨胀产生的光功率损耗增量大小和比较(单位 dB)为

$$\frac{10 \mu\text{m} \quad 15 \mu\text{m} \quad 20 \mu\text{m} \quad 30 \mu\text{m} \quad 40 \mu\text{m}}{0.004 \quad 9 < 0.006 \quad 4 < 0.015 \quad 9 < 0.022 < 0.024 \quad 9}$$

由上述可知,如果要求高的稳定的光耦合效率,则必须要求粘接距离越小越好. 如果以附加损耗小于 0.15 dB 的标准来考察,则必须保证粘胶的厚度在 $16 \mu\text{m}$ 以内.

5 结论

基于有限元理论对平面光波导的粘接进行建模和热应力分析,并对该分析结果进行了讨论,得到:

1) 热应力主要发生在粘接区域,粘接界面的边缘区域对温度变化最敏感,同时粘接界面内部的大部分区域的 Von mises 应力分布基本均匀;

2) 温度变化产生的位移主要由粘胶的膨胀引起,在胶体的玻璃化温度 $T_g = 72^\circ\text{C}$ 时由于热膨胀系数发生突变,则粘接界面之间各轴向位移也发生突变,在温度达到最大值时,由热膨胀产生的位移也达到最大;

3) 通过对应力双折射的定性讨论可得到,粘胶的厚度越大其产生的应力双折射越小,但不同胶体厚度的应力双折射的大小差别不大;同时,厚度越小,集中应力越小;

4) 通过对微位移引起的光功率损耗的讨论可得:粘胶的厚度越大,同等条件下由热膨胀产生的位移越大,由此导致的光功率损耗越大,而且光功率损耗的增幅也变大;如果以附加损耗小于 0.15 dB 的标准考察,则必须要求粘胶的厚度在 $16 \mu\text{m}$ 以内.

本文主要的分析结论对平面光波导的封装工艺研究具有一定的参考价值和指导意义.

参考文献

- [1] ZHANG Rong, FRANK G S. A novel algorithm for fiber-optical alignment automation [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2004, **1**(27): 173-178.
- [2] ZHANG Zhi-yi, LIU Jia-ren, ZHAO Ping, et al. Active alignment of optical fibers to planar waveguide using a thermal-curing adhesive [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **2**(23): 567-572.
- [3] DAUTARTAS M F, BLONDER G E, WANG Yiu-huen, et al. A self-aligned optical subassembly for multi-mode device [J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 1995, **3**(18): 552-557.
- [4] SHA Hui-jun, CHEN Bao-xue. Research of fiber-waveguide automatic alignment system [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2005, **34**(12): 1773-1777.
沙慧军, 陈抱雪. 光波导-光纤耦合对接自动化系统的研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1773-1777.
- [5] PRIYADARSH A, SHIMIN L, MHAISALKAR S G, et al. Characterization of optical properties of acrylate based

- adhesives exposed to different temperature conditions [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, **98**(4):950-956.
- [6] NAGATA H, SHIROISHI M, MIYAMA Y, *et al.* Evaluation of new UV-curable adhesive material for stable bonding between optical fibers and waveguide devices; problems in device packaging[J]. *Optical Fiber Technology*, 1995, **1**(3): 283-288.
- [7] YAMADA Y, HANAWA F, KITO T, *et al.* Low-loss and stable fiber-to waveguide connection utilizing UV curable adhesive[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, **8**(4): 906-908.
- [8] PRIYADARSHI A, FEN L H, MHAISALKAR S G, *et al.* Fiber misalignment in silicon V-groove based optical modules [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(2):170-184.
- [9] ZHANG Li-guo. Research of coupled and packaging for optical planar waveguide[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2003.
张立国. 平面光波导的耦合封装研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [10] WU Yu-lie, ZHENG Yu, LI Sheng-yi, *et al.* Propagation properties analysis of fused taper panda fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **5**(27):1-3.
吴宇列, 郑煜, 李圣怡, 等. 熔锥型熊猫型光纤耦合器的传输特性分析[J]. 光学学报, 2007, **5**(27):1-3.
- [11] LIU Y A, RAHMAN B M A. Analysis of the birefringence properties of optical fibers made by a perform deformation technique[J]. *J Lightwave Technology*, 1995, **13**(2): 142-147.
- [12] SCARMOZZINO R, OSGOOD R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated optics applications [J]. *JOSA A*, 1991, **8**(5):724-731.
- [13] WU Yu-lie, ZHENG Yu, WANG Jin-e, *et al.* Research of azimuthal alignment for Panda fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7):1224-1229.
吴宇列, 郑煜, 王金娥, 等. 熊猫型保偏光纤定轴仿真研究[J], 光子学报, 2007, **36**(7):1224-1229.

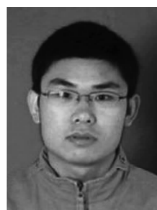
Thermal-stress Analysis of the Adhesive Bonding Between the Planar Optical Waveguides Based on Finite Element Method

XU Zhou-long, ZHENG Yu

(Key Laboratory of Design for Modern Complex Equipment and Extreme Manufacturing, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To study the thermal effect of planar waveguide packaging properties, the situation of adhesive bonding is modeled by the finite element method, and the thermal stress and the axial micro-displacements of the adhesive are analyzed. The regular pattern of the adhesive stress birefringence is calculated qualitatively based on the basis of the photo-elastic theory, and the results show that the edge of the bonding interface region is the most sensitive to temperature change. The optical power loss generated from the axial micro-shifts is also proposed by beam propagation method, and if the excess loss is 0.15 dB. It is found that the thickness of the adhesive should be less than 16 μm . The influences of package performance following temperature changes and different thickness of the adhesive under the same conditions are also summarized.

Key words: Finite element method; Planar optical waveguide; The photo-elastic theory; Beam propagation method



XU Zhou-long was born in 1983. He is working for the M. S. degree at Central South University. His main research interests focus on the packaging reliability of optical planar devices.