

面向板级光互连应用的柔性聚合物波导的制备及其性能评价

刘晓锋^{1,2}, 王国栋², 姚腾飞², 李永凯², 马麟³, 缪桦^{2*}, 孙蓉^{1**}

¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

²深南电路股份有限公司, 广东 深圳 518117;

³上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 现有的柔性波导器件存在加工制备难、机械柔韧性有限、可靠性程度低等难题。基于中性面理论,以聚酰亚胺(PD)薄膜为衬底,设计并制作了具有三明治叠层结构的柔性多模聚合物波导,通过多层中性面的构筑赋予柔性波导优异的结构可靠性和机械柔韧性。所制备的柔性聚合物波导具有低传输损耗(0.16 dB/cm@850 nm)和低通道串扰(<-40 dB)的特性。通过微机械设计使在机械变形过程中施加在波导芯层上的应变最小化,波导表现出优良的机械弯曲性能,其最小弯曲半径低至 3 mm,且以 1 mm 弯曲半径弯曲 1000 次后,其传输损耗无明显增加。可靠性测试实验结果表明,柔性波导具有优异的热稳定性、耐老化性能以及可加工性能,经过湿度循环、温度循环以及无铅回流焊处理后,波导的传输性能并未发生明显劣化。该研究为具有优异机械柔性和环境可靠性的柔性聚合物波导的规模化生产和应用提供了一定的理论与技术指引。

关键词 光学器件; 柔性聚合物波导; 传输损耗; 通道间串扰; 性能可靠性

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0523001

Fabrication and Performance Evaluation of Flexible Polymer Waveguides for Board-Level Optical Interconnection Application

Liu Xiaofeng^{1,2}, Wang Guodong², Yao Tengfei², Li Yongkai²,
Ma Lin³, Miao Hua^{2*}, Sun Rong^{1**}

¹Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

²Shennan Circuits Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518117, China;

³State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Challenges exist in current flexible waveguide devices, such as the fabrication difficulties, mechanical flexibility limitation, and poor reliability. Based on the neutral-plane theory, flexible multimode polymer waveguides with a sandwich structure are designed and fabricated on the polyimide (PI) substrate. The flexible waveguide is endowed with excellent structural reliability and mechanical flexibility by constructing multiple neutral surfaces. The resultant flexible multimode optical polymer waveguides exhibit lower propagation loss (0.16 dB/cm at 850 nm) and lower inter-channel crosstalk (<-40 dB). Excellent mechanical bending property of the flexible waveguides (bending radius less than 3 mm) is also achieved by using micron-mechanical designs to minimize strain exerted on the waveguide core layer during mechanical deformation process. The transmission loss is not significantly increased when the bending radius is 1 mm and the bending is repeated 1000 times. Besides, the reliability test results reveal that the optimized flexible waveguide has excellent thermal stability, aging resistance,

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-09-01

基金项目: 广东省重点研发计划(2020B010180001)

通信作者: *Miaoh@scc.com.cn; **rong.sun@siat.ac.cn

and machinability, for which, the resultant flexible waveguides show no performance degradation after humidity cycling, temperature cycling, and lead-free reflow soldering tests. Hence, this work provides theoretical and technical guidance for the practical mass-production of high quality flexible polymer waveguides with excellent mechanical flexibility and environmental reliability.

Key words optical devices; flexible polymer waveguides; propagation loss; inter-channel crosstalk; performance reliability

1 引言

相较于基于铜线传输的传统电子器件,以光作为信息载体的光子器件,在支持高速大容量低延迟信息传输、降低系统功耗、抗外界电磁干扰等方面具有明显的优势,已成为支撑未来互连通信的关键器件,受到了学术界和产业界的广泛关注^[1-4]。其中,聚合物光波导具有布线灵活、允许多条波导链路在同一平面内实现 1 维交叉、与印刷电路板(PCB)的加工工艺高度兼容、易于实现高密度化等优势^[5-8]。传统的平面波导器件通常是在刚性的衬底上制备完成,所引发的机械拉伸、弯曲等形变严重限制了其进一步的实际应用,并且其难以适应电子产品的高密度、小型化、高可靠性的需求^[9-10]。

因多学科交叉融合而产生的新型柔性光波导器件同时结合了柔性材料与光互连技术的优点,不受传统硬质波导器件本征机械束缚的限制,可灵活自由弯曲、卷绕与扭曲,适应三维空间内任意角度和方向的移动和弯曲,有利于器件便捷装配,极大地拓展了传统光子器件的功能性与应用范围^[11-13]。柔性光波导器件可实现不同子系统间的柔性互连,适用于窄间距、弯曲、折叠可活动等部位的高速连接应用场景,是柔性电路板的理想替代方案,在高速光互连领域展现出广阔的应用前景和巨大的应用价值^[14-16]。柔性波导器件的弯曲、卷绕等各种机械形变不影响器件的正常使用功能。同时,柔性光波导通常需要与电配线的传统印制电路板(PCB)进行层压集成以形成光电混载印刷线路板(EOPCB)^[17-23]。此外,为适应微系统组装集成,EOPCB 需适应表面贴装等工艺,因而对柔性波导器件的可靠性具有非常高的要求。目前在柔性衬底上制备聚合物光波导器件存在加工难、机械柔韧性有限、器件可靠性不足等问题^[2, 14]。

为了实现机械性能和光学性能的最优化,柔性光波导的制作需要综合考虑光学材料的最优选择、结构的精简稳固设计,低成本低难度工艺开发,以及器件在集成方面的可靠性。本文基于一款干膜类波导材料,利用中性面理论设计并制作了一种三明治

结构的柔性波导,对柔性波导的传输损耗、通道串扰以及耐弯性能等传输特性进行了详细的表征分析,同时考察了该柔性波导在不同弯曲半径下及多次弯曲后传输损耗的变化,并进一步利用热重分析(TGA)、85%相对湿度及 85 °C 条件下的老化实验、温度循环、无铅回流焊等测试对柔性聚合物波导的环境可靠性进行了研究。

2 柔性波导的设计与制作

2.1 结构设计

聚酰亚胺(PI)薄膜具有优异的机械柔韧性、稳定性及介电性能,同时具有宽的工作温度范围(-269~400 °C),可承受弯曲、扭曲等机械形变且支持高温加工工艺,是柔性波导器件理想的支撑衬底材料^[24]。因此,本文以 PI 薄膜为衬底及覆盖膜材料,以松下公司提供的一款环氧树脂型干膜状光学树脂作为波导材料,以杜邦公司提供的 PYRALUX® FR 作为黏附层材料设计了三明治叠层结构。如图 1(a)所示,该叠层结构从下往上依次为 PI 衬底、波导下包层、波导芯层、波导上包层、亚克力黏附性胶层及 PI 覆盖层。此三明治叠层结构可为柔性波导提供物理支撑,并阻隔水汽以提供良好的耐候性能。利用梁弯理论,通过构建中性面实现波导层所受应力与应变最小化,从而提高波导结构的耐弯性能,并实现最小弯曲半径。

在不考虑层与层之间相互作用的理想情况下,对于多层薄膜材料而言,在其弯曲时,材料中间存在一个以 O 为圆心、 R 为半径,受力为零的中性层^[2, 25]。如图 1(b)所示,中性层两侧同时存在两个方向相反的应力,即内侧的压应力和外侧的拉应力。当结构均匀的薄膜材料弯曲时,在中性面 z 位置处由弯曲引起的拉伸应变可以表示为

$$\epsilon_z = \frac{\gamma}{R}, \quad (1)$$

式中: γ 为点到中性面的距离; R 表示中性轴的半径。非均匀结构的双层薄膜材料弯曲时所产生的应变可表示为

$$\epsilon_{z'} = \frac{d_1 + d_2}{2R} \frac{\chi\eta^2 + 2\eta + 1}{(1 + \chi\eta)(1 + \eta)}, \quad (2)$$

$$\chi = \frac{E_1}{E_2}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{d_1}{E_2}, \quad (4)$$

式中： E_1 、 E_2 分别表示两种材料的杨氏模量； d_1 、 d_2 分别表示两层材料的厚度。可见，离中性轴面越近，器件在弯曲时受到的应变越小。对于由多层薄膜组成的柔性波导器件，通过将核心光学器件层放置在多层堆叠薄膜的中性面位置，可最大限度地减小器件在弯曲过程中所产生的形变，从而实现器件的光电性能在小的半径弯曲范围内并不受形变影响的效果^[14,26]。

根据经典欧拉-伯努利梁弯曲理论，当弯曲半径

$R \gg \sum_{i=1}^n d_i$ ，中性面的位置 b 可以表示为

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i d_i \left[\left(\sum_{j=1}^i d_j \right) - \frac{d_i}{2} \right]}{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i d_i}, \quad (5)$$

$$\bar{E}_i = \frac{E_i}{1 - \nu_i^2}, \quad (6)$$

式中： \bar{E}_i 代表平面应变杨氏模量； ν_i 是泊松比； d_i 是第 i 层的厚度。依据中性面原理，对柔性波导的各叠层结构进行了优化设计，各材料的杨氏模量、泊松比以及最优化叠层结构厚度见表 1。

表 1 各材料的弹性模量、泊松比和叠层厚度

Table 1 Elastic modulus, Poisson's ratio, and film thickness of materials

Material	Young's modulus E_i /GPa	Poisson's ratio ν_i	Thickness d_i /μm
PI substrate	2.9	0.38	110
Cladding material	2.2	0.33	40 (under layer), 70 (upper layer)
Core material	2.5	0.34	50
Adhesive layer	1.3	0.32	50
PI cover layer	2.9	0.38	50

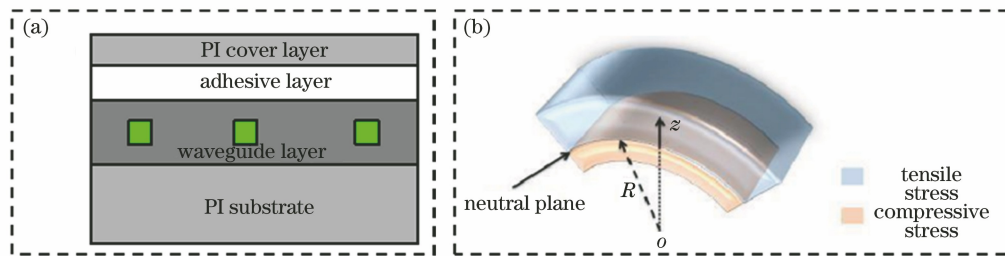


图 1 中性面应力分布，以及柔性聚合物波导三明治结构示意图。(a) 柔性聚合物波导三明治结构示意图；(b) 中性面应力分布示意图；

Fig. 1 Diagrams of stress distribution on neutral plane and flexible polymer waveguide with sandwich-like structure.

(a) Diagram of flexible polymer waveguide with sandwich-like structure; (b) diagram of stress distribution on neutral plane

2.2 柔性波导的制作

图 2 为三明治结构柔性聚合物波导的制作工艺

流程图。首先，利用等离子表面处理机对 PI 薄膜进行活化与粗化处理。然后，在 PI 薄膜的表面依次形

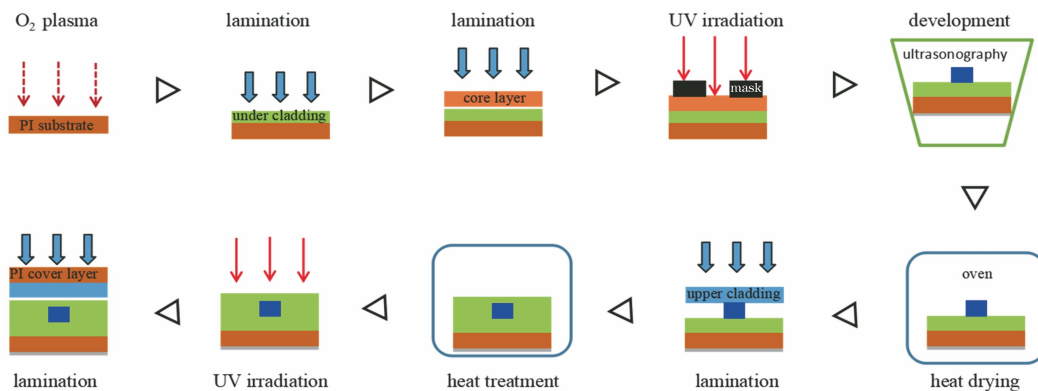


图 2 柔性波导制作流程图

Fig. 2 Illustration of fabrication process of flexible waveguides

成波导下包层、芯层以及上包层,相应的芯层波导线路通过传统的光刻法制备。最后,在波导上包层表面压合一层含有胶层与 PI 薄膜的覆盖膜。

3 分析与讨论

3.1 形貌表征

本文利用掩模版制备了 12 芯多模聚合物光波导的矩形波导阵列。首先,利用 3D 激光共聚焦显微镜对制得波导的三维立体几何形貌进行了表征,结果如图 3(a)所示。由图可知,制作的波导芯侧壁相对平滑,且具有较高的陡直度,波导芯的物理几何

尺寸接近 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 。采用金相显微镜的明场模式,利用白光穿透样品对所制作波导阵列的尺寸一致性以及截面相貌进行观察。为了获得更好的对比度,将背景色调整为绿光。受限于视场范围,实验中仅观察到 5 个波导通道。这些波导芯尺寸具有良好的 consistency,同时波导芯显示出明亮的矩形光斑,如图 3(b)所示。图 3(c)显示了采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察到的波导俯视图。可以看到,波导芯棱角分明,且在约 $700\ \mu\text{m}$ 长度的观察视野范围内,波导芯的尺寸均一,这进一步证实了金相显微镜测试结果的正确性。

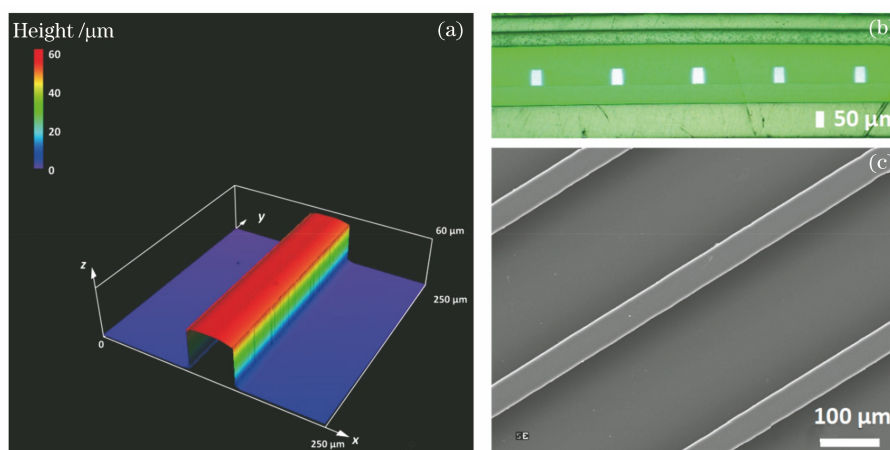


图 3 形貌表征结果。(a)激光共聚焦显微镜下的波导三维形貌;(b)光学显微镜观察到的波导截面透光图;(c)典型的波导俯视图(SEM 图)

Fig. 3 Results of morphology characterization. (a) Three dimensional shape of waveguide obtained by laser confocal microscope; (b) cross-section micrographs of polymer waveguide observed by optical microscope; (c) typical top view of waveguides (SEM image)

3.2 传输特性

光纤与波导耦合对接时,光束在粗糙的波导界面处容易发生严重的散射^[27-28]。为提高耦合效率,减小由端面耦合带来的插入损耗,采用研磨设备对柔性聚合物波导的端面进行了研磨抛光处理。如图 4(a)所示,将端面研磨好的样品固定在耦合平台,搭建以分布式反馈激光器 (DFB) 为光源、输入端光纤和输出端光纤的纤芯直径分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $62.5\ \mu\text{m}$ 的多模光纤耦合测试实验系统,并对柔性波导进行了插入损耗以及串扰测试。值得注意的是,为最大限度地减小耦合损耗,在入射光纤与波导输入端之间滴加少量折射率匹配液。图 4(b)为 $10.5\ \text{cm}$ 长度柔性聚合物波导的通道插损测试结果图。由图可知,波导具有较低的插入损耗,其传输损耗值为 $0.20\ \text{dB}/\text{cm}@850\ \text{nm}$ (含端口耦合损耗),且其通道

插损值较为稳定,这侧面反映出波导制备及研磨工艺的稳定性。图 4(c)显示的是采取截断法测试的不同长度柔性波导的插损值随长度的变化曲线。从图中可以看出,所制作波导的线性归一化传输损耗值为 $0.16\ \text{dB}/\text{cm}@850\ \text{nm}$,相应的耦合损耗值为 $0.79\ \text{dB}$ 。图 4(d)显示的是柔性波导输出端串扰测试结果。测试方法为:在输入端保持最佳耦合的情形下,利用输出端的接收光纤进行水平扫描,并用功率计探测不同位置处光纤接收的光功率,扫描步长为 $10\ \mu\text{m}$,Ch. 1、Ch. 2、Ch. 3 和 Ch. 4 是 4 个波导芯。由图 4(d)可知,柔性波导的相邻通道间串扰约为 $-40\ \text{dB}$,表明实验所制备的波导侧壁光滑,通过散射而进入包层区域的光较少。本文所制备波导的通道间距设置为 $250\ \mu\text{m}$,串扰主要来源于模式转换,即包层模转化为邻近波导中传输的导模^[6,17]。

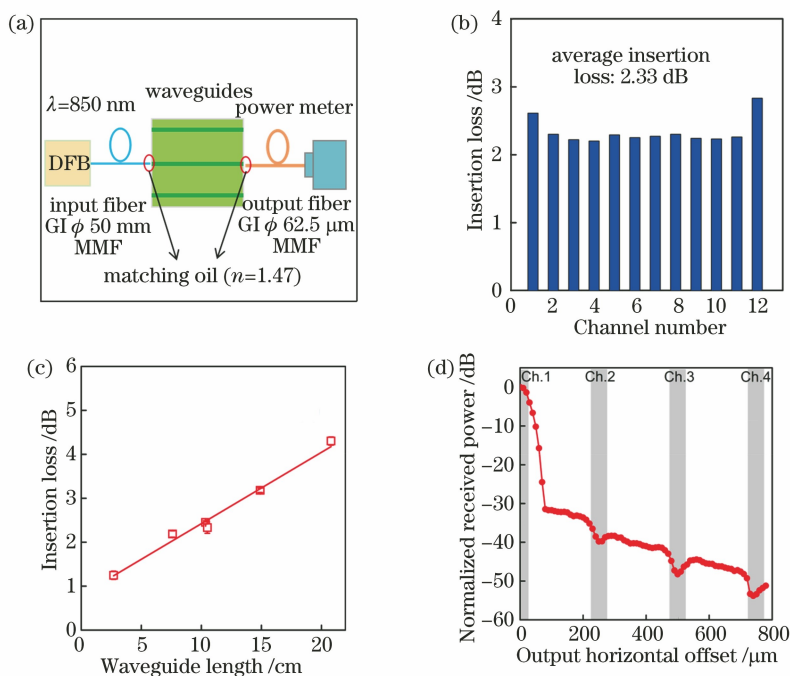


图 4 柔性波导传输特性。(a)波导耦合测试系统示意图;(b) 10.5 cm 波导通道插入损耗;

(c)截断法测试得到的波导传输损耗;(d)波导通道串扰测试结果图

Fig. 4 Transmission characteristics of flexible waveguide. (a) Diagram of waveguide coupling test system; (b) insertion loss of 10.5 cm waveguide channel; (c) measured propagation loss of waveguide using truncation method; (d) test results of waveguide channel crosstalk

3.3 弯曲特性

柔性光波导具有高度的机械灵活性,可自由弯折卷曲,极大提高了光互连系统的灵活性^[29-31]。与光纤类似,波导的宏弯会造成光信号传输的损失。但是,对于应用于板级光互连领域的柔性光波导器件而言,小的弯曲半径所引起的低损耗增量是必要的。将 20 cm 长度的柔性聚合物波导缠绕在不同半径的金属圆柱体上,进行插入损耗测试。波导的插入损耗与弯曲半径的关系曲线见图 5(a)。由图可知,当波导弯曲半径为 3 mm 时,传输损耗增量仅为

0.3 dB,但当薄膜弯曲半径小于 3 mm 时,弯曲损耗迅速增大,进而确定了柔性波导可以弯曲的最小半径(R_{min})为 3 mm。此外,研究了所制得的 10.5 cm 柔性波导 12 通道在不同半径的金属圆柱体上向两个方向反复进行 1000 次 360°弯曲前后的插入损耗变化[图 5(b)]。作为对比参考,还给出了波导在直波导状态下的插入损耗值。结果表明,在 3 mm 半径金属圆柱体上进行 1000 次弯曲后,波导没有产生明显的额外损耗。而在 1 mm 半径金属圆柱体上进行 1000 次弯曲后,波导的插入损耗略微增大,这可能

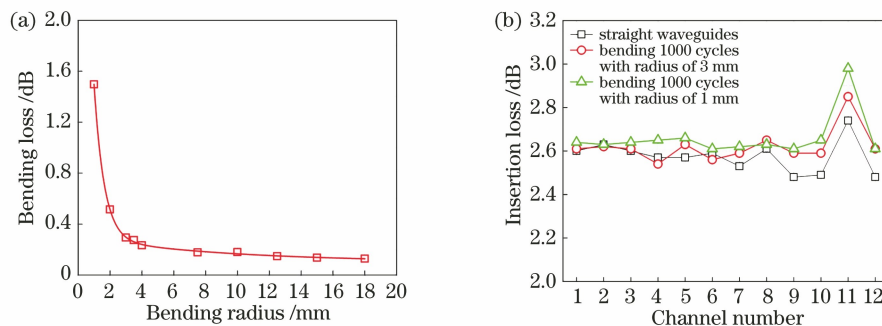


图 5 弯曲损耗与弯曲半径和通道数的关系。(a)弯曲半径与弯曲损耗的关系;(b) 1 mm 和 3 mm 弯曲半径下弯曲 1000 次后波导插入损耗的变化

Fig. 5 Relationship among bending loss, bending radius, and channel number. (a) Relationship between bending loss and bending radius; (b) insertion loss of waveguide after 1000 times bending with bending radii of 1 mm and 3 mm

是因为波导纤芯在小的弯曲半径下产生了微小的裂纹。整体而言,该基于中性面设计的三明治叠层结构柔性波导表现出优良的柔韧性和弯曲可靠性,其可允许的最小弯曲半径为 3 mm,在 1 mm 弯曲半径下进行 1000 次的弯曲后,损耗未发生明显变化。

3.4 可靠性研究

为了评估该柔性聚合物光波导的性能可靠性,采用 TGA 测试对波导材料的热稳定性进行表征;在 85% 相对湿度及 85 °C 条件下对波导进行了长达 500 h 的老化测试;采用温度循环实验(温度设置为 -40~85 °C,每 30 min 循环 1 次,共循环 400 h)对波导的抗剪切疲劳性能进行测试;对样品进行 5 次无铅回流焊温度循环处理以评估波导在后续板级封装过程中的可靠性,图 6 为波导可靠性实验结果。实验所用无铅回流焊的温度-时间变化曲线如图 6(c)所示,最高温度达 275 °C。

图 6(a)和(b)分别为样品在氮气氛围下的热失重(TG)和微商热失重(DTG)曲线图。材料质量分

数损失为 5 % 时对应的温度通常被定义为初始分解温度(T_{d5}),该温度可以作为其热稳定性的度量。波导包层和芯层材料的初始分解温度分别为 399 °C 和 387 °C。如图 6(a)、(b)所示,波导芯层和包层材料均在氮气中具有很好的热稳定性。对柔性波导样品进行 85% 相对湿度及 85 °C 条件下的老化实验、温度循环实验以及无铅回流焊实验后,未观察到任何的断裂、开裂和分层的现象。此外,对比波导样品在各种可靠性测试前后的光传输损耗变化,发现实验样品的损耗值仅发生略微增大,波导传输性能未表现出明显的劣化,见图 6(d)。经过 85% 相对湿度及 85 °C 条件下的老化实验、温度循环实验以及 5 次无铅回流焊循环处理后,光波导的传输损耗分别增加了 0.004 dB/cm、0.013 dB/cm 以及 0.001 dB/cm。由此可知,所制备的柔性聚合物光波导不仅具有良好的性能稳定性,还能承受光电集成线路板的无铅回流焊工艺,满足实际应用场景中波导的长期稳定和可靠性的使用需求^[32-33]。

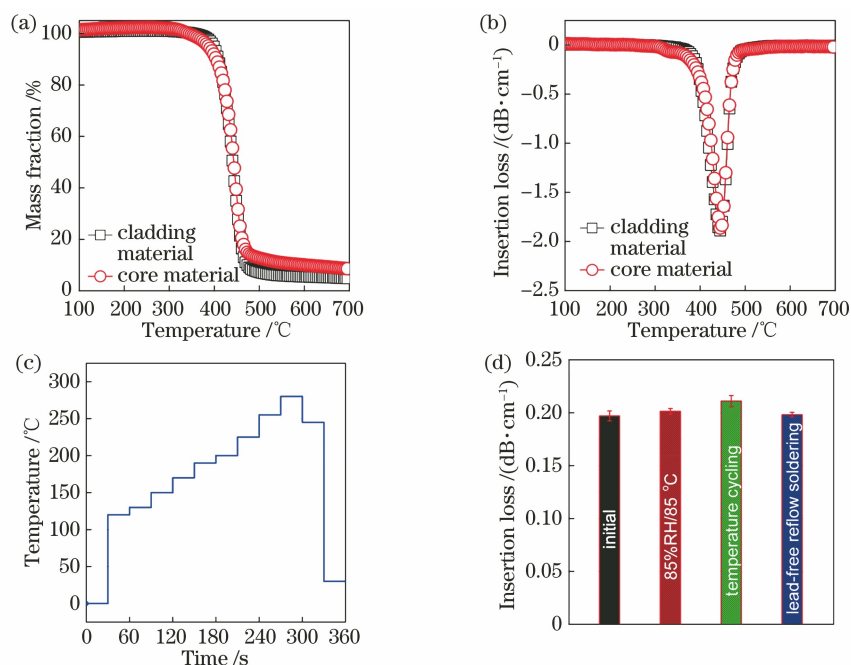


图 6 波导可靠性实验结果。波导材料在 N_2 氛围下的(a) TG 与(b) DTG 曲线,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$;

(c) 回流焊温度-时间曲线;(d) 环境可靠性实验得到的波导传输损耗变化

Fig. 6 Experimental results of waveguide reliability. (a) TG and (b) DTG curves of polymer waveguide materials at heating rate of $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ under N_2 ; (c) temperature-time curve of reflow soldering; (d) propagation loss of waveguides obtained by environmental reliability test

4 结 论

利用干膜波导材料,采用光刻工艺制备了具有低传输损耗($0.16\text{ dB/cm}@850\text{ nm}$)及小串扰

($<-40\text{ dB}$)的多模聚合物光波导。基于中性面原理,设计并构建了具有高可靠抗弯折的三明治叠层结构柔性波导。该柔性聚合物波导表现出优异的耐弯性能,最小弯曲半径为 3 mm,且经过 1000 次

1 mm 半径弯曲实验后,该波导未出现明显的传输损耗变化。经过 85% 相对湿度及 85 °C 条件下的老化实验、温度循环以及无铅回流焊等测试后,柔性波导的传输损耗未发生明显的劣化,这表明其具有良好的热稳定性、结构可靠性以及耐老化性能。所制备的具有高可靠性、优良耐弯性能的柔性聚合物光波导可作为核心光学组件应用于板级光电互连领域,展现出广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Lorang D J, Tanaka D, Spadaccini C M, et al. Photocurable liquid core-fugitive shell printing of optical waveguides [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(43): 5055-5058.
- [2] Nocentini S, Riboli F, Burrelli M, et al. Three-dimensional photonic circuits in rigid and soft polymers tunable by light [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3222-3230.
- [3] Wang L L, Zhang D M, Lian T H, et al. Polymeric waveguide thermo-optic switch based on directional coupler [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0704002.
王力磊, 张大明, 廉天航, 等. 基于定向耦合结构的聚合物波导热光模式开关研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0704002.
- [4] Ma H, Jen A K Y, Dalton L R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(19): 1339-1365.
- [5] Bamiedakis N, Hashim A, Penty R V, et al. A 40 Gb/s optical bus for optical backplane interconnections [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1526-1537.
- [6] Xu X, Ma L, Jiang S, et al. Circular-core single-mode polymer waveguide for high-density and high-speed optical interconnects application at 1550 nm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25689-25696.
- [7] Dangel R, Horst F, Jubin D, et al. Development of versatile polymer waveguide flex technology for use in optical interconnects [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 3915-3926.
- [8] Dangel R, Berger C, Beyeler R, et al. Polymer-waveguide-based board-level optical interconnect technology for datacom applications [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, 31(4): 759-767.
- [9] Mao J B, Yang W, Feng X J, et al. Research status of flexible electro-optical circuit for interconnection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080004.
毛久兵, 杨伟, 冯晓娟, 等. 柔性光电互联电路研究现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080004.
- [10] Ji L F, Ma R, Zhang X M, et al. Application of laser lift-off technique in flexible electronics manufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0100001.
季凌飞, 马瑞, 张熙民, 等. 激光剥离技术在柔性电子制造领域的应用研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0100001.
- [11] Li L, Lin H T, Qiao S T, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 643-649.
- [12] Ye Y T, Ma H, Sun C L, et al. Research progress on flexible photonic materials and devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030001.
叶羽婷, 马辉, 孙春雷, 等. 柔性光子材料与器件的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030001.
- [13] Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823018.
陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用 [J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823018.
- [14] Bamiedakis N, Beals J, Penty R V, et al. Cost-effective multimode polymer waveguides for high-speed on-board optical interconnects [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(4): 415-424.
- [15] Li L, Zou Y, Lin H T, et al. A fully-integrated flexible photonic platform for chip-to-chip optical interconnects [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 4080-4086.
- [16] Yang S L, Yang L, Li B, et al. Fabrication and transmission of optical polymer waveguide backplane for high-performance computers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14605-14617.
- [17] Choi C, Lin L, Liu Y J, et al. Flexible optical waveguide film fabrications and optoelectronic devices integration for fully embedded board-level optical interconnects [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2168-2176.
- [18] Xu X, Ma L, Zhang W J, et al. Fabrication and performance evaluation of polymer waveguides for optical printed circuit board applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0613001.
徐晓, 马麟, 张文甲, 等. 面向光印刷电路板的聚合

- 物光波导制备及性能研究[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0613001.
- [19] John R S E, Amb C M, Swatowski B W, et al. Thermally stable, low loss optical silicones: a key enabler for electro-optical printed circuit boards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(4): 814-819.
- [20] Wu J H, Immonen M, Yan H J, et al. Application of multimode polymer waveguide in optical-electrical printed circuit board [J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(5): 291-294.
吴金华, Marika Immonen, 严惠娟, 等. 多模聚合物波导在光电印制板中的应用[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(5): 291-294.
- [21] Jin W, Chiang K S, Lor K P, et al. Industry compatible embossing process for the fabrication of waveguide-embedded optical printed circuit boards [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(24): 4045-4050.
- [22] Hashim A, Bamiedakis N, Penty R V, et al. Multimode polymer waveguide components for complex on-board optical topologies [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(24): 3962-3969.
- [23] Li K, Pang F F, Wu J H, et al. Fabrication and performance testing of the low-loss interconnect polymer optical waveguide [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(4): 716-719.
李康, 庞拂飞, 吴金华, 等. 低损耗聚合物互连光波导的制备及性能测试[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(4): 716-719.
- [24] Sun J Y, Lu N S, Yoon J, et al. Inorganic islands on a highly stretchable polyimide substrate[J]. Journal of Materials Research, 2009, 24(11): 3338-3342.
- [25] Hsueh C H. Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(12): 9652-9656.
- [26] Sekitani T, Zschieschang U, Klauk H, et al. Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability [J]. Nature Materials, 2010, 9(12): 1015-1022.
- [27] Kruse K, Riegel N, Demars C, et al. Optical waveguide end roughness in correlation to optical coupling [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8267: 82670N.
- [28] Deng C L, Song Z Q, Pang F F, et al. Research on fabrication and vertical coupling of 45° micromirror with laser stepped ablation method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1103001.
邓传鲁, 宋志强, 庞拂飞, 等. 激光阶梯刻蚀法制备 45°微反射镜及垂直耦合研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1103001.
- [29] Zuo H, Yu S, Gu T, et al. Low loss, flexible single-mode polymer photonics[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11152-11159.
- [30] Dou X Y, Wang X L, Lin X H, et al. Highly flexible polymeric optical waveguide for out-of-plane optical interconnects[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 16227-16233.
- [31] Prajzler V, Neruda M, Nekvindová P. Flexible multimode polydimethyl-diphenylsiloxane optical planar waveguides[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(7): 5878-5884.
- [32] Kim J T, Park S, Ju J J, et al. Low bending loss characteristics of hybrid plasmonic waveguide for flexible optical interconnect [J]. Optics Express, 2010, 18(23): 24213-24220.
- [33] Janta-Polczynski A, Cyr E, Langlois R, et al. Solder-reflowable single-mode fiber array photonics assembly in high-throughput manufacturing facilities [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10924: 109240X.