

文章编号:1001-5078(2015)06-0599-06

· 综述与评论 ·

# 有机聚合物光波导制作工艺综述

刘涛,李志山,蒋志,杨敏,王书荣

(云南师范大学 太阳能研究所,教育部可再生资源材料先进技术与制备重点实验室,  
云南省农村能源重点工程实验室,云南 昆明 650500)

**摘要:**有机聚合物光波导光互连已成为实现短距离计算通信设计目标的最佳解决方法。短距离光互连是未来互连方向,综合性能优良的聚合物多模光波导是光互连中的重要组成部分。有机聚合物光波导的制作工艺对光波导的性能具有重要影响,故此对有机聚合物光波导的制作工艺进行了综述,并提出了一些未来的研发方向。

**关键词:**聚合物光波导;光波导制作工艺;光损耗

**中图分类号:**TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.06.001

## Fabrication process of organic polymer optical waveguide

LIU Tao, LI Zhi-shan, JIANG Zhi, YANG Min, WANG Shu-rong

(Solar Energy Research Institute, Key Laboratory of Advance Technology and Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, Yunnan Province Key Lab of Rural Energy Engineering, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The organic polymer optical waveguide interconnects become the best solution to realize short distance computation and communication design. Short distance optical interconnection is the direction of future interconnects, and excellent comprehensive performance of polymer multimode optical waveguide is an important component in optical interconnection. The fabrication process of organic polymer optical waveguide has important influence on the performance of optical waveguide, therefore the fabrication process of organic polymer optical waveguide is summarized, and puts forward some own ideas.

**Key words:** polymer optical waveguide; polymer optical waveguide fabrication process; optical loss

### 1 引言

信息时代下,人们对数据传输性能的要求越来越高。在长距离有线通信领域,光纤通信技术能够满足这种高性能需求,然而在短距离信息传输方面,因成本要求,目前仍然以电互连为主。但电互连存在固有的电磁干扰、高损耗和低带宽等

缺点,限制了数据传输性能的进一步提升。光波导作为光信号通道,其较之电信通道具有高带宽、抗电磁干扰、低损耗、低能耗、低串扰、小物理尺寸等优点,使光互连成为解决高速电信号互连瓶颈的一个有效方法<sup>[1-2]</sup>,早已成为关注和研究的焦点。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 61167003)资助。

**作者简介:**刘涛(1988-),男,硕士研究生,主要从事光波导器件的研究。

**通信作者:**王书荣,博士,副教授,主要从事半导体材料和半导体光电子器件研究。E-mail: shrw88@aliyun.com

**收稿日期:**2014-09-12; **修订日期:**2014-11-04

目前认为光电印刷电路板(OPCB)之间的互连采用光纤带比较好,而在OPCB内各模块之间的互连采用嵌入式光波导互连很有前途,且光波导是芯片间光互连的必然选择<sup>[3-5]</sup>。虽然传统的有机聚合物光波导在通信波长(1.31  $\mu\text{m}$ 和1.55  $\mu\text{m}$ )传输损耗高、温度稳定性差,但其光学特性、热学特性、柔韧性可以通过热处理及合成过程进行改进<sup>[6-7]</sup>;且新型有机聚合物作为一类光波导材料通常有大的透明窗口、柔韧性好、通信波段损耗低、易于加工等优点<sup>[8]</sup>,其优越的综合性能使其成为加工制作光通信元件的首选材料。随着聚合物光通信的蓬勃发展,其在光通信领域的应用前景日益显著;将OPCB集成于超级计算机中,可使其计算速度提高1000倍以上<sup>[2,9]</sup>。加之,高带宽聚合物多模光波导能否在光互连中大规模应用,主要取决于其损耗特性、热特性和成本,而光波导制作工艺对光波导性能和成本有重大影响,因此本文着重对目前光波导的光损耗特性和各种制作工艺进行较全面的综述,同时也指出未来聚合物多模光波导的研发方向。

## 2 有机聚合物光波导的性能和应用要求

有机聚合物光波导的性能主要是光损耗特性和热特性,而光波导的光损耗主要取决于散射损耗;其中散射损耗包括表面散射损耗和体散射损耗。光波导芯层表面会有一定的粗糙度,这会引来一定程度的表面散射损耗。体散射损耗主要是由材料中各种杂质,以及成型光波导中的结构缺陷、裂纹、折射率不均匀等各种缺陷引起;为了最小化体散射损耗,光波导材料必须为高纯材料,尽量减少波导中的缺陷并保证芯层表面光滑,且制作过程中必须在严格清洁的超净室完成<sup>[10]</sup>。因此,有机聚合物光波导制作工艺对光波导的光损耗性能有重要影响。有机聚合物光波导的热特性主要是热稳定性、热老化特性,及光损耗和波导折射率与温度的变化关系,有机聚合物光波导制作工艺对光波导的热特性也有决定性的意义。

聚合物多模光波导光互连的应用需要满足如下基本要求<sup>[11]</sup>:①在通信波长850 nm、1310 nm、1550 nm等附近的传输损耗低;②有较高的光电非线性系数与热稳定性( $T_d > 250\text{ }^\circ\text{C}$ ,能经受集成光电装置时的热焊过程),较低的介电常数与热损耗系数;③其制作工艺简单、与电子加工技术相兼

容、重复性好、成本低,且所制备的光波导散射损耗小、尺寸稳定、柔韧性好;④芯层比包层的折射率至少大0.8%,各层之间粘附性好,且具有匹配的热膨胀系数;⑤光波导各接触层之间不相溶,后续层的固化温度应该小于前一层的玻璃态转化温度 $T_g$ ,即下包层固化温度 > 芯层固化温度 > 上包层固化温。

## 3 有机聚合物光波导制作工艺

### 3.1 光刻法

(1)平板影印(Photolithography)技术,一般的平板影印工序<sup>[12]</sup>如图1所示,其中烘干是为了增加胶膜的耐磨性及层间的粘附性;曝光是为了让胶膜充分吸收光能发生光化学反应,其关键控制参数是曝光时间、曝光波长及曝光量: $E = It$ (其中, $I$ 为光强, $t$ 为曝光时间)。对于以紫外光固化材料作为芯层及包层材料,并用平板影印技术加工制作光波导,其制作工序可以省略热固化过程<sup>[13]</sup>。这种技术成熟、工艺简单且与PCB加工工艺兼容性高、可实现大面积生产,其缺点在于需要严格控制侧蚀,制作符合尺寸要求的光波导,材料需为光敏材料<sup>[14]</sup>。

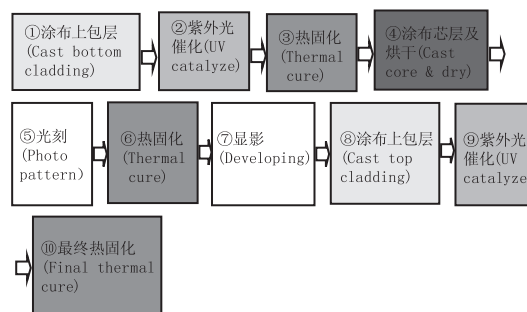


图1 一般的平板影印工序

对于光致抗蚀剂(Photoresist),若曝光部分发生交联反应,经过显影后,曝光部分保留下来而未曝光部分被除掉,称其为负性光致抗蚀剂,反之则称为正性光致抗蚀剂。选择光致抗蚀剂时不但要考虑其是否满足作为光波导材料的基本要求,还要考虑其涂布的均匀性、对光源的灵敏度、图形的分辨率以及对蚀刻工艺的耐腐蚀性等因素<sup>[15]</sup>。若以正性光致抗蚀剂作为光波导芯层材料,则在使用过程中芯层可能会因为缓慢曝光而折射率发生改变进而失去传输光信号的能力,故通常选择负性光致抗蚀剂作为光波导材料。

(2)光漂白(Photo-bleaching)技术,光漂白技术

制作聚合物光波导的工序如图2所示。

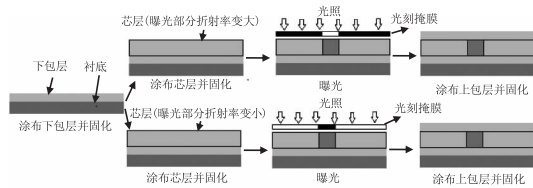


图2 不同芯层材料(上/下面为曝光部分  
折射率变大/小)的光波导光漂白工序

其原理是利用某些聚合物材料所特有的光敏性,在光照下曝光部分发生光化学反应,通过控制曝光时间和曝光光强,控制曝光部分薄膜的折射率,最终在曝光部分与未曝光部分形成折射率差,同时避免了其他制备方法中物理作用、化学作用对器件的损伤<sup>[16]</sup>。这种技术的优点在于工艺简单、效率高、折射率易控、对器件损伤小,缺点在于要求材料为特殊光敏材料<sup>[17]</sup>。此外光漂白技术可以制作低散射损耗、低串扰的渐变折射率圆芯光波导<sup>[18]</sup>。

(3)反应离子蚀刻(RIE)技术,对于不同的材料以反应离子蚀刻工序制作光波导,其工序不尽相同;以紫外固化环氧树脂(UV Cured Epoxy Resins)为材料制作光波导为例<sup>[19]</sup>,工序如图3所示。

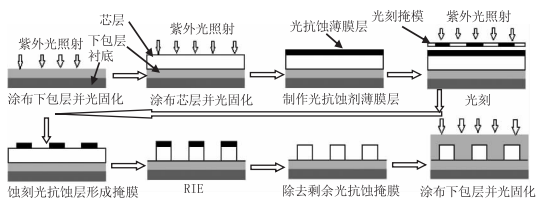


图3 反应离子蚀刻工序(以紫外固化环氧树脂  
为材料制作光波导为例)

而对于以聚硅氧烷为包层材料,以氟化聚硅氧烷为芯层材料制作光波导时,其固化过程为热固化过程<sup>[20]</sup>。反应离子蚀刻技术属于干法刻蚀技术,是利用高能量等离子体轰击及化学反应来达到蚀刻的一项技术<sup>[6]</sup>。因为蚀刻过程中,工艺参量对被蚀刻元件的质量有决定性影响,这些工艺参量主要包括:射频功率、腔室压强、反应时的抽速、反应气体与辅助气体的混合比等。这些参量之间既独立可调又相互影响,因而蚀刻工艺有相当大的灵活性。这一技术的优点在于工艺成熟、与传统集成电路工艺相兼容、无材料限制、对器件损伤小;缺点在于工艺复杂、加工效率低、侧壁粗

糙度大、造价较高。

### 3.2 模板复制法

(1)加热模压(Hot Embossing)技术,其制作工序如图4所示。

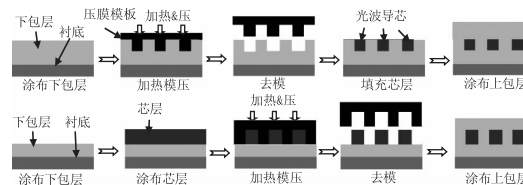


图4 两种加热模压制造光波导过程  
(上面为凹槽填充法;下面为脊形覆盖法)

用此方法制作光波导,首先需根据所需制作光波导的几何结构及间距,设计制作满足需求且表面光滑的高精度压膜模板。该方法工艺简单成本较低,可实现大面积生产<sup>[21-22]</sup>,但其对模板要求高,且加热模压过程中会对膜层产生损伤致使传输损耗较大。对于凹槽填充法,若填充的芯层材料过多(对于脊形覆盖法,若加热模压过程不充分),光波导之间下包层上有芯层薄膜残留,将会增加信道间串扰。根据压膜模板材料的不同,加热模压工艺分为金属模压工艺和橡胶模压工艺<sup>[22]</sup>。

(2)软光刻(Soft Lithography)技术,其特点是用弹性模代替加热模压中使用的硬模,其优点在于软光刻灵活性更高、不受材料限制、可以在非平面内制作光波导,并能用于制作三维结构,折射率渐变圆芯光波导,且没有光散射、衍射带来的精度限制<sup>[23]</sup>,其缺点在于对原始母板及柔性印模的高精度要求。软光刻过程中控制弹性模的形变量是获得高质量光波导的关键。用此工艺制作光波导前,首先要根据需求制作原始母板,然后以原始母板用再铸模法制作柔性印模<sup>[24]</sup>。用于制作柔性印模的材料有聚氨酯(Polyurethanes)、聚酰亚胺(Polyimides)和Novolac树脂等,但是相对而言聚二甲基硅氧烷(Poly-dimethyl-siloxane, PDMS)的综合性能高,是软刻蚀技术中最常用的印模材料。最后以柔性印模制作光波导,主要有再铸模法、微传递成模、毛细管成模、溶剂辅助成模四种不同的方法<sup>[18]</sup>。

### 3.3 其他方法

除以上介绍的聚合物光波导加工工艺外,还有多种其他加工工艺,如表1所示。

表1 部分聚合物光波导加工方法对比

聚合物光波导加工方法	主要优点	主要缺点
激光烧蚀	工艺简单,加工精度高,易于制作柔性化光波导,速度快,无污染,成本低	波导边沿粗糙度大,有烧蚀残留
紫外光直写 <sup>[25]</sup>	工艺简单,较为成熟,可实现大尺寸加工	制作周期长,设备昂贵,侧蚀需要严格控制,光敏材料
双光子直写 <sup>[26]</sup>	工艺简单,材料内部直接成型	制作周期长,设备昂贵,波导形貌不易控制,材料难得
电子束直写 <sup>[27]</sup>	工艺简单,材料上直接成型	设备昂贵,粗糙度难控制,可加工面积有限
质子束直写	工艺简单,材料上直接成型	设备昂贵,可加工面积有限,波导成型结构受界面效应影响
空间选择极化	工艺简单	材料的特性要求较高,控制折射率较难
微针孔直写 <sup>[28]</sup>	工艺简单,大面积生产,渐变折射率圆芯光波导	不能制作交叉结构的光波导,波导成型结构受界面效应影响

## 4 不同材料及光波导加工工艺传输损耗对比

表2 光波导传输损耗比较

光波导制作机构	波导成型工艺	光波导芯材料	传输损耗 dB/cm(波长 $\mu\text{m}$ )
NTT	Photolithography	SU-8	0.07(0.68),0.08(0.83),0.50(1.31),4.72(1.55)
	RIE	SU-8	0.24(0.68),0.13(0.83),0.68(1.31),4.76(1.55)
	RIE	Halogenated Acrylate	0.02(0.83),0.07(1.31),1.7(1.55)
	RIE	Deuterated Polysiloxane	0.17(1.31),0.43(1.55)
Micro-resist Tech.	Photolithography	Polysiloxane	0.1(0.85),0.26(1.30)
Dow Corning	Photolithography	Polysiloxane	0.04(0.85)
Rohm & Haas	Photolithography	Polysiloxane	0.03(0.85)
State Key Lab. of Modern Opt. Instrum., Zhejiang Univ.	Photolithography	SU-8	0.019(0.6328),0.036(0.83),0.077(1.31),0.125(1.55)
Technical Univ. of Dortmund	Soft Photolithography	Poly-dimethyl-siloxane	0.035(0.85)
Allied Signal	Photo-exposure & Wet Etch, RIE, Laser Ablation	Acrylate	0.02(0.84),0.2(1.30),0.5(1.55)
		Halogenated crylate	<0.01(0.84),0.03(1.30),0.07(1.55)
		UV Acrylate	0.02(0.84),0.03(1.30);0.05(1.55)
	Laser Ablation, RIE	Halogenated Acrylate	0.01(0.84),0.06(1.30)
IBM and Dow Corning	Spin Coating and UV Photolithography	WG-1010	0.031(0.85)
	Draw-down Coating and UV-Laser Direct Writing	WG-1010	0.046-0.050(0.85)
Asahi Glass Co. Ltd.	UV Photolithography	Perfluorinated Poly (butenyl vinyl ether)	0.047(1.31),0.049(1.55),0.070(1.65)
Faculty of Science and Technology, Keio Univ.	Mosquito Method	UV curable silicone resins	0.033-0.045(0.85)
	Soft-lithography	PMMA	0.027(0.85)

从表2可以看出,一般来说,相同条件下较之其他工艺,平板影印工艺制作的光波导的损耗较低;对于聚硅氧烷光敏化材料,采用平板影印工艺制作的多模光波导,在850 nm通信窗口,其最低损耗为0.03 dB/cm,这是目前得到的较好结果。尽管采用软光刻法制作的PMMA多模光波导,在850 nm通信窗口,其传输损耗最低为0.027 dB/cm,但是以PMMA材料制作的光波导热稳定特性较差;采用激光直写或激光烧蚀法制作的聚合物多模光波导,虽然也可获得较低的光损耗,但制作成本较高;SU-8光波导材料虽然廉价,但光传输损耗较大;丙烯酸酯类光波导的传输损耗低,但热稳定性差。

## 5 结 语

综上所述,虽然国内外对有机聚合物光波导光通信的相关研究已取得一定的成果,但仍然需要从材料、加工工艺、光耦合技术、光互连技术、集成光学等相关方面进行研发。就加工工艺而言,目前存在多种优缺点不尽相同的聚合物光波导制作工艺,结合我们对聚合物光波导的研制经历,认为对于紫外光可固化聚合物光波导材料,较之其他工艺,平板影印工艺制作的光波导的综合性能优良,且适用于工业化生产,是一种实用性强的工艺。对于这种工艺,重点研究曝光光强及烘烤温度对光波导特性的影响。再者,未来研发的方向主要是研制新型低成本紫外光敏化聚合物材料,且要求该材料的光传输特性和热稳定性较好,只有达到此结果,才能早日实现低成本低损耗聚合物多模光波导短距离光互连的目标。

## 参考文献:

- [1] CHO I K, YOON K B, AHN S H. Experimental demonstration of 10 Gbit/s transmission with an optical backplane system using optical slots[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(13):1635-1637.
- [2] TAUBENBLATT A M. Optical interconnects for high-performance computing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4):448-458.
- [3] 行松健一. 光开关与光互连[M]. 崔敦杰,译. 北京:科学出版社,2002:87-93.
- [4] ZHANG Yimo. Optics inter-connected networks techniques[M]. Beijing: Publishing House of electronics Industry, 2006:134-145. (in Chinese)
- [5] WITTMANN B, JOHNCK M, NEYER A, et al. POF-Based Interconnects for Intracomputer Applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(5):1243-1248.
- [6] JAE-WOOK K, JAE-PIL K, WON-YOUNG L, et al. Low-loss fluorinated poly(arylene ether sulfide) waveguides with high thermal stability[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(6):872-875.
- [7] Eldada L, Shacklette L W. Advances in polymer integrated optics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(1):54-68.
- [8] KIM J S, KANG J W, KIM J J. Simple and low cost fabrication of thermally stable polymeric multimode waveguides using a UV-curable epoxy[J]. *Jpn. J. Applied Phys.*, 2003, 42(3):1277-1279.
- [9] Tan M R T, McLaren M, Jouppi N P. Optical Interconnects for high-performance computing systems[J]. *IEEE Micro*, 2013, 33(1):14-21.
- [10] Kinoshita R, Moriya K, Choki K, et al. Polymer optical waveguides with gI and W-Shaped cores for high bandwidth density On-Board interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24):4004-4015.
- [11] 张金星. 基于光波导互连的EOPCB的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [12] Roger Dangel, Folkert Horst, Daniel Jubin, et al. Development of versatile polymer waveguide flex technology for use in optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24):3915-3926.
- [13] Joon-Sung Kim, Jang-Joo Kim. Stacked polymeric multimode waveguide arrays for two-dimensional optical Interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(4):840-844.
- [14] Houbertz R, Domann G, Cronauer C, et al. Inorganic-organic hybrid materials for application in optical devices[J]. *Thin Solid Films*, 2003, 442(1-2):194-200.
- [15] Streppel U, Dannberg P, Achter C W, et al. New Wafer-scale fabrication method for stacked optical waveguide interconnects and 3d micro-optic structures using photo-responsive(inorganic-organic hybrid) polymers[J]. *Optical Materials*, 2003, 21(1-3):475-483.
- [16] Hong MA, Alex K Y Jen, Larry R Dalton. Polymer-based optical waveguides: materials processing and devices[J]. 2002, 14(19):1339-1365.
- [17] Mederer F, JÄGer R, Unold H J, et al. 3-Gb data transmission with GaAs VCSEL over PCB integrated polymer waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,

- 2001,13(9):1032-1034.
- [18] 刘伟庭. 柔性微图形复制技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [19] Koji Enbutsu, Makoto Hikita, Ryoko Yoshimura, et al. Multimode polymeric optical waveguides with high thermal stability using UV cured epoxy resins[J]. Jpn. J. Applied Physics,1998,37(6B):3662-3664.
- [20] Usui M, Hikita M, Watanabe T, et al. Low-loss passive polymer optical waveguides with high environmental stability [J]. J. Lightwave Technology, 1996, 14 ( 10 ): 2338-2343.
- [21] Joon-Sung Kim, Jae-Wook Kang, Jang-Joo Kim. Simple and low cost fabrication of thermally stable polymeric multimode waveguides using a UV-curable epoxy[J]. Jpn. J. Applied physics,2003,42(3):1277-1279.
- [22] Byung-Tak Lee, Min-Suk K, Jun-Bo Yoon, et al. Fabrication of polymeric large-core waveguides for optical interconnects using a rubber molding process[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2000,12(1):62-64.
- [23] 倪玮. 基于软光刻的短距离光互连研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- [24] Guomin Jiang, Baig S, Wang M R. Flexible polymer waveguides with integrated mirrors fabricated by soft lithography for optical interconnection[J]. Journal of Lightwave Technology,2013,31(11):1835-1841.
- [25] Griese E. A high-performance hybrid electrical-optical interconnection technology for high-speed electronic systems [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging,2001,24(3):375-383.
- [26] Ishihara Jiro, Komatsu K, Sugihara K, et al. Fabrication of three-dimensional calixarene polymer waveguides using two-photon-assisted polymerization [J]. Applied Physics Letters,2007,90(3):033511-033511-3.
- [27] Maruo Y Y, Sasaki S, Tamamura T. Channel-optical-waveguide fabrication based on electron-beam irradiation of polyimides [J]. Applied Opt., 1995, 34 ( 6 ): 1047-1052.
- [28] Soma K, Ishigure T. Fabrication of a graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using a microdispenser for a high-density optical printed circuit board [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,2013,19(2):3600310-3600310-10.