

聚硅氧烷改性及多模光波导制备

冯向华^{1,3} 季家镛¹ 窦文华²

¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
² 国防科学技术大学计算机学院, 湖南 长沙 410073
³ 解放军信息工程大学理学院, 河南 郑州 450001

摘要 采用含氢聚硅氧烷(HPSO)和乙烯基苯(DVB)的交联体掺入聚二甲基硅氧烷(PDMS)中,使改性的聚二甲基硅氧烷(M-PDMS)折射率发生 1%~1.8% 的改变。M-PDMS 及 PDMS 薄膜具有良好的光透射率和低的传输损耗,是低成本制备用于高速芯片间光互连聚合物光波导的理想材料。采用软成型和图案转移法,用 M-PDMS 及 PDMS 分别作波导的芯层和包层制备了截面为 50 μm ×50 μm ,长度大于 20 cm 的聚硅氧烷多模光波导。用数字化散射法测量了所制备波导的传输损耗,测得输入光波长为 633 nm 时平均传输损耗为 0.137 dB/cm。

关键词 薄膜;芯片间光互连;聚硅氧烷波导;交联体;图案转移法;传输损耗

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0531003

Fabrication of Modified Polydimethylsiloxane and Multimode Optical Waveguides

Feng Xianghua^{1,3} Ji Jiarong¹ Dou Wenhua²

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
³ College of Science, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The modified polydimethylsiloxane (M-PDMS) is synthesized by adulterating cross-linking of polysiloxane (HPSO) and divinylbenzene (DVB) into polydimethylsiloxane (PDMS). M-PDMS refractive index contrast PDMS are changed by 1%~1.8%. PDMS and M-PDMS bulk samples have well transmittance and low propagation loss. These benefits realize high productivity and low-cost mass production of large core multimode optical waveguides for optical interconnection. M-PDMS and PDMS are used for the core layer and the cladding layer. Large core(50 μm ×50 μm) multimode optical waveguides are fabricated by the soft molding and simple replication, the length of waveguides is more than 20 cm. The optical propagation loss of waveguides is 0.137 dB/cm measured by digital scattering method at 633 nm.

Key words thin films; inter-chip optical interconnection; polysiloxane waveguide; cross-linking; pattern transfer method; propagation loss

OCIS codes 310.2790; 130.5460; 200.4650; 230.7370

1 引 言

近年来,光学互连研究重点集中在如何将光学功能器件单元集成到传统的印制电路板上,特别是应用聚合物光波导作为光层集成到印制电路板上,

制成光电印制电路板(OEPCB)^[1~4],实现芯片间光互连。由于聚硅氧烷光波导具有在 850 nm 的互联波长窗口高度透明性,高度的温度稳定性;能承受标准多层印制电路板 180 °C 的层压处理 2 h 和 230 °C

收稿日期: 2011-11-21; **收到修改稿日期**: 2011-12-07

基金项目: 国家 973 计划(2012CB933504)资助课题。

作者简介: 冯向华(1965—),女,副教授,主要从事非线性光学、光通信器件的应用等方面的研究。

E-mail: fengxianghua2002@hotmail.com

的锡焊处理 2 min;成本效益低,适合大规模生产的优势,一直受到关注,并成为研究的热点^[5~8]。Zhu 等^[8]使用标准商用聚二甲基硅氧烷(PDMS)和德国 Wacker 公司的特殊产品做波导的包层和芯层,测试出 PDMS 波导具有良好的温度、湿度等稳定性。

制备波导首先要得到合适折射率的芯层和包层聚合物,目前已经研究和使用的有光漂白法^[9],凝胶溶胶法混杂有机硅烷法^[10]等。由于要制备适合芯片间光互连的大尺寸长波导,不仅要求聚合物的折射率合适,还要求聚合物对采用的制作工艺适宜。本文采用含氢聚硅氧烷(HPSO)和二乙烯基苯(DVB)的交联体掺入 PDMS 中,使 PDMS 的折射率发生 1%~1.8% 的改变;采用软成型和图案转移法,制备了长度大于 20 cm 的聚硅氧烷多模光波导,波导平均传输损耗为 0.137 dB/cm。

2 实 验

2.1 聚合物原料

PDMS:无色透明液体,主体与固化剂按 10:1 比例混合后室温动力粘度为 4 Pa·s,在可见光波段理论上接近 100% 透光率,具有很好的透光性。HPSO:无色透明液体,室温动力粘度 24 mPa·s,含氢 1.4%(质量分数),分子式如图 1 所示,其中 m 和 n 为整数。DVB:淡黄色透明液体,室温下粘度小于 10 mPa·s,工业纯,用作 HPSO 的交联剂。氯铂酸($H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$):分析纯,溶于无水乙醇,用作 HPSO 与 DVB 交联反应的催化剂。HPSO 与 DVB 在低温下交联为脆性固体^[11],它容易被磨细成微粉,在 370 °C~800 °C 时裂解可得陶瓷微粉,被认为

是低成本制备高性能陶瓷材料的理想先驱体。图 2 为 HPSO 与 DVB 交联产物的结构示意图,从图中看出苯环已交联到碳键上。

2.2 样品折射率及传输损耗

HPSO 与 DVB 交联为脆性固体,不能成膜。采用 PDMS、固化剂、HPSO、DVB 四种液体分别按 3 种容积比:10:1:5:2、10:1:5:2.5 和 10:1:5:3 混合,75 °C 时加热 20 min,然后继续加热在 100 °C 下保持 10 min,断电后自然降温,固化后均成透明薄膜为改性的聚二甲基硅氧烷(M-PDMS)。M-PDMS 折射率用阿贝折射仪测量,在室温下,折射率与 DVB 所占容积份额的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出 DVB 容积份额的增加可提高聚合物的折射率,与 DVB 交联的苯环数量相关。固化成膜后的折射率对应 3 种容积比分别为 1.4280、1.4310 和 1.4365。

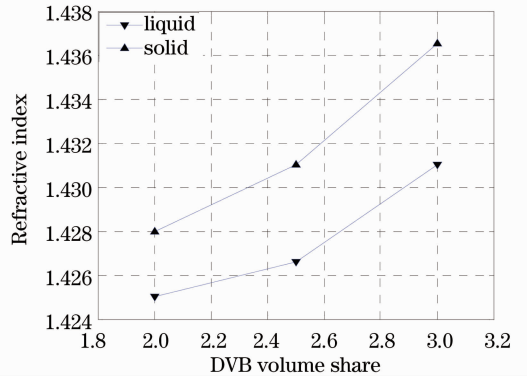


图 3 室温下折射率与 DVB 容积份额的关系
Fig. 3 Relation of refractive index and DVB volume share at room temperature

PDMS 与固化剂按 10:1 比例混合,在 21 °C 时测得折射率 $n=1.4150$,在恒温箱中 75 °C 保持 20 min 制备成 PDMS 薄膜,成膜后测得折射率为 $n=1.4180$ 。

由分光光度计 Japan HITACHI IU-4100 测得 PDMS 透射率光谱如图 4 中实线所示,传输损耗如图 5 中实线所示。测到 M-PDMS 固化后折射率为 1.4280 的薄膜透射率光谱如图 4 中虚线所示,传输损耗如图 5 中实线所示。

从样品的透射率和传输损耗图中可以看出,改性后折射率为 1.4280 薄膜的透射率对比改性前略有减少,传输损耗对比改性前略有增加,但改性后材料同样满足近红外波段透射率高,在 1.3 μm 处损耗小于 0.05 dB/cm,在 1.55 μm 处损耗小于 0.15 dB/cm,在 0.85 μm 处的损耗小于 0.05 dB/cm;还具有的优点

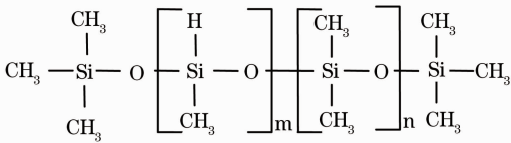


图 1 HPSO 分子式
Fig. 1 Formula of HPSO

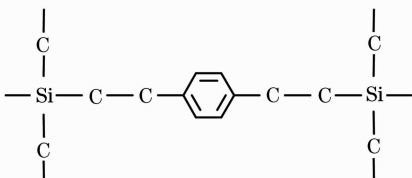


图 2 DVB/HPSO 交联产物的结构示意图
Fig. 2 Structure of cross-linking of DVB/HPSO

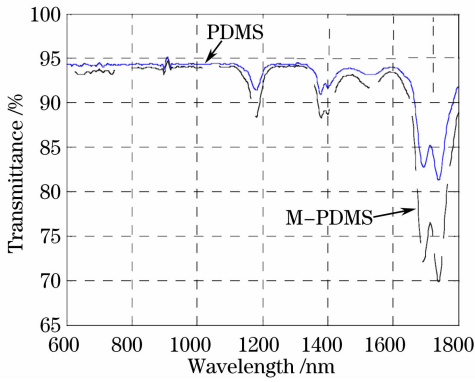


图 4 PDMS 和 M-PDMS 样品的透射率

Fig. 4 Transmittance of PDMS and M-PDMS bulk samples

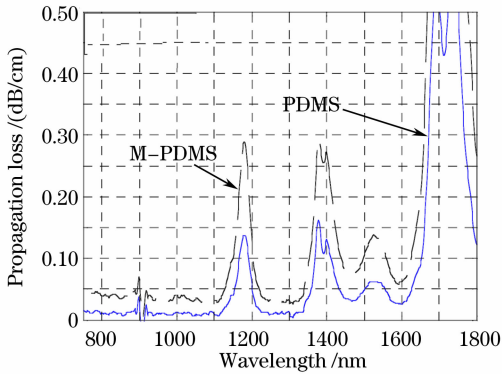


图 5 PDMS 和 M-PDMS 样品的传输损耗

Fig. 5 Propagation loss of PDMS and M-PDMS bulk samples

为:热稳定性优异(含-Si-O-主链),在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳定且有弹性。所以极其适宜用于通讯波段为 850 nm 的芯片间光互连系统。

在制备陶瓷材料时,氯铂酸用作 HPSO 与 DVB 交联反应的催化剂,可以提高交联样品的凝胶含量。但在多次实验中发现,氯铂酸酒精溶液的淡黄色会影响膜的透明度,在材料固化的过程中酒精的存在容易形成气泡,影响成膜质量,所以在薄膜和波导的制备过程没有使用氯铂酸做催化剂。实验中通过提高反应温度和延长固化时间来增加材料的交联程度。

3 光波导制备及传输损耗

所制备光波导的设计尺寸为 $50\text{ }\mu\text{m}\times 50\text{ }\mu\text{m}$,芯层和包层的材料分别为 M-PDMS 和 PDMS。考虑到波导较长,所以选用的芯层折射率在常温下为 1.4280 ,与包层折射率 1.4180 相差 0.1% 。制备工艺采用软成型和图案转移制备技术^[12,13],步骤如图 6 所示:含有芯层图案模板的制备;用机械式直涂

法涂覆包层材料在模板上,图案转移,直接得到下包层;用芯层材料填充包层上图案凹槽做芯层,用包层材料涂覆在包含芯层的下包层之上做上包层,固化形成波导阵列。得到光波导阵列长度大于 20 cm ,图 7 为所制备的 12 条光波导的扫描电镜图像,图中相邻波导的中心相距 $250\text{ }\mu\text{m}$,可同时传输 12 路光信号。

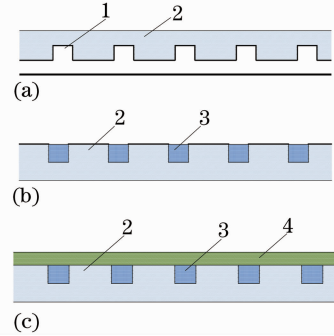


图 6 聚硅氧烷光波导的制备工艺流程图。1:模板, 2:下包层,3:芯层,4:上包层

Fig. 6 Fabrication process for polysiloxane optical waveguide. 1: hard mould, 2: under-cladding; 3: core, 4: over-cladding

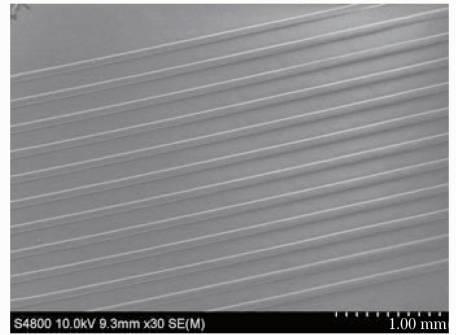


图 7 12 条光波导的扫描电镜图像

Fig. 7 Scanning electron microscope image of the 12 ridge waveguide arrays

采用 PDMS 及其改性材料制备波导优势为:PDMS 膜柔软并具有低的表面能,即使模板面积大也容易从模版上脱模;可以制作任意形状、任意尺寸的波导;且 M-PDMS 与 PDMS 同种基质材料物理化学特性匹配,在包层上填充芯层材料时易于操作。但对界面的光滑程度要求较高,即要求模具表面微观起伏的均方差越小越好。

由有效折射率法^[14],按照所制备的波导尺寸,固定包层折射率 1.418 ,理论计算出传输模式数随芯层折射率的关系如图 8 所示,从图中可以看出传输模式数随芯层折射率逐渐接近包层折射率而减少。本波导芯层包层折射率相差 $\Delta n=0.01$,在同样

的波导尺寸下传输模式少,相应的传输损耗减少;波导的数值孔径 $NA = \sqrt{1.428^2 - 1.418^2} \approx 0.169$,接近通常常用光纤的数值孔径在 0.18~0.23,适用光纤与波导的直接耦合。

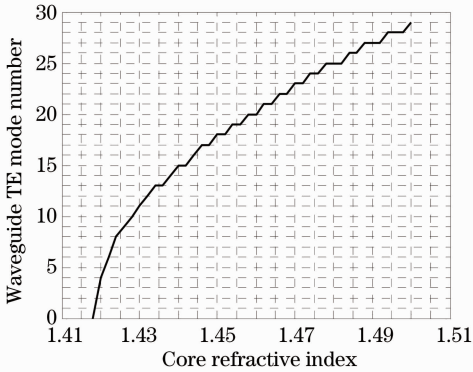


图 8 波导中 TE 模式数与芯层折射率的关系

Fig. 8 Relation between TE mode number and core refractive index

采用数字化散射法分段测出输入波长为 633 nm 时波导光功率传输损耗,该方法的原理^[15]为采用数字成像器件 CCD 对传输线上各点的散射光强进行记录,转换成内部传输光强,用中值滤波处理消除

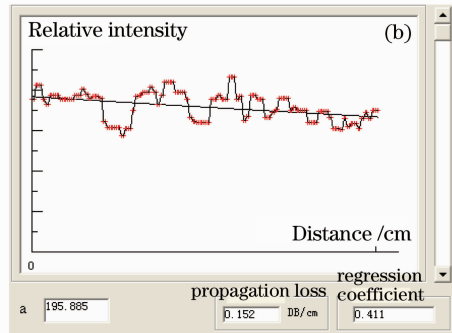
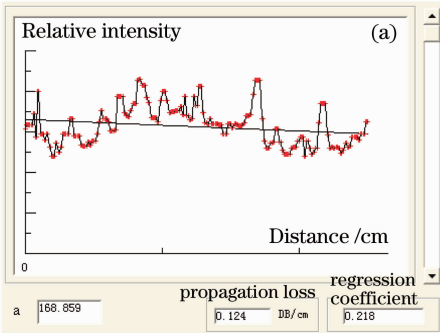


图 10 散射光强度分布图。(a) a 段波导;(b) b 段波导

Fig. 10 Scattering light intensity distribution along propagation length. (a) a segment waveguide; (b) b segment waveguide

4 结 论

采用 HPSO 和 DVB 的交联体掺入 PDMS 中,使 M-PDMS 的折射率发生 1.0%~1.8% 的改变,但其光透射率和传输损耗与 PDMS 相差很小;由于用 M-PDMS 的芯层和 PDMS 的包层折射率相差很小,在大截面的波导中减少了传输模式,并且波导的数值孔径与常用光纤的数值孔径相差小,适宜光纤与波导的直接耦合。采用软成型和图案转移法,制备了长度大于 20 cm 的聚硅氧烷多模光波导,输入光波长为 633 nm 时波导平均传输损耗为

图像中的尖锐噪声,拟合出传输衰减曲线并计算衰减系数,从而计算出波导的传输损耗。

实验中沿波导测量了 11 段样品的传输损耗值,图 9 为其中的一小段波导的 CCD 数字成像图,图 10 为测量的两小段波导 a 段和 b 段散射光强分布图。波导中的杂质或缺陷会造成散射光强的涨落,但由于整段波导是在特定条件下一次性制备,所以杂质或缺陷的影响可以认为在整段波导中平均分布。由拟合出的传输衰减曲线计算出 a 段波导的传输损耗为 0.124 dB/cm, b 段波导的传输损耗 0.152 dB/cm。对整段波导 11 段测量结果的平均值为 0.137 dB/cm。

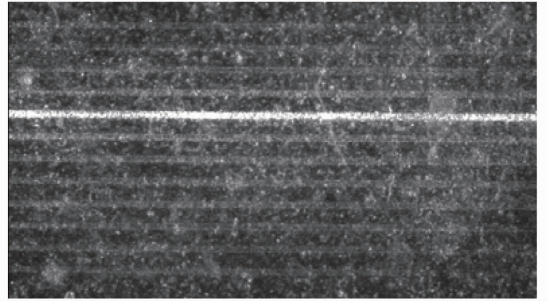


图 9 波导 CCD 数字成像图

Fig. 9 Digital image of CCD camera

0.137 dB/cm。用此材料制备大尺寸长波导,可使波导的制备工艺简单、易于操作,成本低廉。本文所用聚合物材料和制备方法还适用于其它光波导器件的制备,在芯片间光互联高速数据传输方面具有十分光明的应用前景。

参 考 文 献

- Xiaolong Wang, Wei Jiang, Li Wang *et al.*. Fully embedded board-level optical interconnects from waveguide fabrication to device integration[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(2): 243~250

- 2 T. Mikawa, M. Kinoshita, K. Hiruma *et al.*. Implementation of active interposer for high-speed and low-cost chip level optical interconnects[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electronics*, 2003, **9**(2): 452~459
- 3 Ni Wei, Wu Xingkun. Soft-lithography-based inter-chip optical interconnection circuit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 813~818
倪 玮, 吴兴坤. 基于软光刻的片间光学互连线路[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 813~818
- 4 Liu Yanting, Ni Wei, Wu Xingkun. A soft-lithography-based vertically coupling structure for multilayered optical interconnection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 349~354
刘彦婷, 倪 玮, 吴兴坤. 基于软光刻的多层光互连垂直耦合结构[J]. 光学学报, 2008, **28**(2): 349~354
- 5 S. Kopetz, E. Rabe, W. J. Kang *et al.*. Polysiloxane optical waveguide layer integrated in printed circuit board[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(11): 668~669
- 6 A. Neyer, S. Kopetz, E. Rabe *et al.*. Electrical-optical circuit board using polysiloxane optical waveguide layer[C]. Orlando: Electronic Components and Technology Conference, FL, 2005, 246~250
- 7 Sung Hwan Cho. Optofluidic waveguides in teflon AF-coated PDMS microfluidic channels[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1057~1059
- 8 D. Zhu, D. Cai, S. Kopetz *et al.*. Environmental stability of PDMS waveguides for electrical-optical circuit boards [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(11): 627~628
- 9 Tong Canning, Chen Baoxue, He Lei *et al.*. Study on poly (Methylphenylsilane)-poly (benzylMethacrylate) copolymer waveguide fabricated by photobleaching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1613~1617
- 童灿明, 陈抱雪, 何 磊 等. 光漂白法制备 PMPS-PBzMA 共聚物光波导的技术研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1613~1617
- 10 Woo-Soo Kim, Jong-Hwan Lee, Sang-Yung Shin *et al.*. Fabrication of ridge waveguides by UV embossing and stamping of sol-gel hybrid materials[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1888~1890
- 11 Ma Qingsong, Chen Zhaohui, Zheng Wenwei *et al.*. Curing of polysiloxane and its pyrolytic conversion to ceramics[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2005, **21**(2): 279~282
马青松, 陈朝辉, 郑文伟 等. 聚硅氧烷/二乙烯基苯的交联与裂解陶瓷化研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, **21**(2): 279~282
- 12 Feng Xianghua, Weng Changli, Ji Jiarong *et al.*. Studying of polysiloxane multimode optical ridge waveguides applying in optical interconnection [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(1): 38~41
冯向华, 温昌礼, 季家镛 等. 用于光互连的聚硅氧烷脊型光波导研究[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(1): 38~41
- 13 Feng Xianghua, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. Fabrication of polysiloxane optical ridge waveguides for optical interconnection [C]. *SPIE*, 2010, **7847**: 784723
- 14 Ji Jiarong, Feng Ying. High Optics Tutorial [M]. Beijing: Science Press, 2008. 243~248
季家镛, 冯 莹. 高等光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 243~248
- 15 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Qiu Linlin *et al.*. Digital measurements and fabrication of low loss optical organic polymer waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1142~1145
蒋 毅, 曹庄琪, 仇琳琳 等. 低损耗有机聚合物光波导的制备及其数字化测量技术[J]. 光学学报, 1999, **19**(8): 1142~1145

栏目编辑: 韩 峰