材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022052402

面向光背板应用的低损耗单模聚合物光波导技术研究

庄语迪[1*]，石　莹[1]，汤宁峰[2,3]，魏晓强[2]，何祖源[1]

（1. 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；
2. 中兴通讯股份有限公司，广东 深圳 518055；3. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室，广东 深圳 518055）

摘　要： 系统地开展了基于光刻及湿法显影工艺制备的聚合物光波导散射损耗的理论及实验研究。研究了包括粗糙度、波导尺寸和工作波长等主要参数对散射损耗的影响，采用激光共聚焦显微镜测量了光波导侧壁及上下表面的粗糙度。实验结果表明，波导侧壁的平均粗糙度约为60 nm，是上下表面粗糙度的3倍。因此，散射损耗主要由侧壁粗糙引起，其大小是上下表面粗糙引入散射损耗的9倍。基于上述理论及实验结果，通过优化波导设计，制备了工作于1 310 nm波长、平均损耗为0.35 dB/cm的低损耗单模聚合物光波导，其作为高速高密度光背板的关键传输介质具有良好的应用前景。

关键词： 光互连；聚合物波导；散射损耗

中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1142－06

Research on Low Loss Single-mode Polymer Waveguides for Optical Backplane Applications

ZHUANG Yudi[1], SHI Ying[1], TANG Ningfeng[2,3], WEI Xiaoqiang[2], HE Zuyuan[1]

(1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN; 2. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, CHN;
3. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, CHN)

Abstract: The roughness-induced scattering loss ($Loss_R$) of photolithography-fabricated polymer optical waveguide was investigated theoretically and experimentally. The effects of the $Loss_R$ including roughness, waveguide dimension, and operation wavelength on the $Loss_R$ were studied. The roughness of the waveguide's sidewall and top/bottom surface was measured by employing a laser confocal microscope. The results show that the average roughness of sidewall is about 60 nm, which is 3 times of that of top/bottom surface. As a result, the $Loss_R$ of sidewall is dominant and is 9 times of that of top/bottom surface. Based on the above theory and experimental results, low-loss single mode polymer waveguides operating at the wavelength of 1 310 nm with average loss of 0.35 dB/cm were designed and fabricated, which have broad application prospect as the key transmission media of the high-speed high-density optical backplane.

Key words: optical interconnect; polymer waveguide; scattering loss

0　引言

随着云计算、大数据、物联网的蓬勃发展，数据通信带宽呈爆炸式增长，电互连技术已难以满足高速率信息互连的需求，已成为限制光传送系统、高性能计算机的内部互连网络和大规模数据中心性能进一步提高的瓶颈[1]。而光互连技术具备超高速、低功耗和低成本等诸多优势，作为未来数据通信的主流技术，将被广泛应用于超级计算机、数据中心、宽

收稿日期：2022－05－24.
基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFB1802900)；中兴通讯研究基金.
* **通信作者：**庄语迪　**E-mail：** yudi.zhuang@sjtu.edu.cn

带通信等国家战略性信息领域[2]。

聚合物光波导具有互连速率及密度高、制备工艺与高速印刷电路板(Printed Circuit Board,PCB)完全兼容、材料成本低和可实现大面积制备等显著优点,作为板级高速光互连应用中的关键传输媒质受到学术界和产业界的广泛关注。

多模聚合物光波导在 850 nm 波长处的传输损耗低至 0.05 dB/cm[3-4],其与标准多模光纤具有良好的兼容性、稳定性。经过 1 000 h 老化测试及五次回流焊后,各项性能无显著劣化,并在 946 mm 长的聚合物光波导上实现了 30 Gb/s NRZ 信号的无误码传输以及小于前向纠错(Forward Error Correction,FEC)门限的 56 Gb/s PAM4 信号传输[5]。这些结果表明,基于多模聚合物波导的光背板是有望在部分场景中率先实现应用的可行方案。

另一方面,随着近年来硅基光电子及共封装技术的快速发展,具有聚合物材料天然优势,可以工作于 1 310 nm 或 1 550 nm 波长的单模聚合物波导被认为是实现单通道 112 Gb/s,400 Gb/s 甚至 1 Tb/s 高速光背板的关键传输介质,正在成为这一领域的研究热点[6]。但相较于工作于 850 nm 的多模聚合物波导,工作于 1 310 和 1 550 nm 的单模聚合物波导具有更高的传输损耗,一定程度限制了它们的应用。传输损耗高的一个原因是传统聚合物材料在 1 000～1 600 nm 波长处存在强烈的 C—H 键吸收。为了降低吸收损耗,研究人员合成了多种在 1 310 及 1 550 nm 波段具有高透明度的聚合物材料,如含氟聚酰亚胺、氟化聚酰亚胺和全氟异丁烯酸甲酯等[7-10]。另一个导致高传输损耗的原因是波导芯层和包层界面的粗糙度和缺陷[11]。目前已有研究从实验上证实了采用渐变折射率分布的波导芯设计可以有效地降低多模聚合物波导的损耗和串扰[12-13],还有一些关于硅波导缺陷与散射损耗间关系的报道[14-15]。但粗糙度对单模聚合物波导散射损耗的影响机理尚缺少系统性的研究。由于单模波导芯径通常小于 10 μm,这意味着其芯层与包层交界的模场功率交叠比例较大,由粗糙度引入的散射损耗相较于具有更大尺寸波导芯的多模波导将更加显著。另外,由于光刻工艺本身的特性,上下表面粗糙度和侧壁粗糙度对散射损耗的影响也有所不同。

本文系统地研究了聚合物波导中由粗糙度引入的散射损耗($Loss_R$)。分别研究了 $Loss_R$ 与各种参数的关系,包括粗糙度参数、波导尺寸、工作波长和折射率差,并分别计算和测量出了 $Loss_R$,理论与实验结果具有良好的一致性。研究结果表明,由侧壁粗糙度引入的 $Loss_R$ 是上下表面粗糙度引起 $Loss_R$ 的 9 倍。当波导宽度减小时,尤其当波导宽度小于 10 μm 时,$Loss_R$ 急剧增加。基于上述理论及实验结果,设计制备了工作于 1 310 nm 的 $Loss_R$ 小于 0.35 dB/cm 的低损耗单模聚合物波导,其作为光背板的关键传输介质具有良好的应用前景。

1　理论分析

根据 Marcuse 耦合模式理论[16],波导平均功率损耗系数如式(1):

$$\alpha_{\mathrm{cm}^{-1}}=\sum\int_{-n_2k}^{n_2k}|\overline{K}_{pi}|^2\,|F(\beta_i-\beta)|^2\left(\frac{|\beta|}{\rho}\right)\mathrm{d}\beta \tag{1}$$

式中,n_2 为包层折射率,k 为波矢,$\overline{K}_{pi}$ 为从第 i 阶导模到第 p 阶辐射模的平均耦合系数,F 为扰动函数 $f(z)$的傅里叶变换,β 为模式传输常数。由导模到辐射模的耦合造成的辐射损耗由 $f(z)$的傅里叶变换决定,即当空间频率为导模与辐射模的传输常数差时,如果 $f(z)$的傅里叶变换在该空间频率处的频谱幅度 F 恰好具有一定的幅值时,就会发生模式耦合,从而导致散射损耗。一个侧壁受扰动的矩形波导示意图如图 1(a)所示,波导的 Y-Z 部分平面及由 $f(z)$定义的粗糙轮廓如图 1(b)所示:

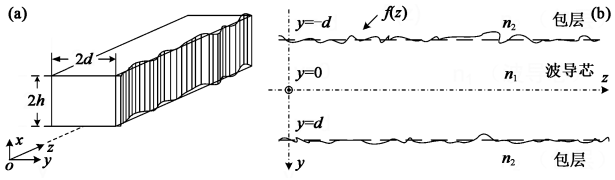


图 1　受扰动波导的示意图(a)以及波导粗糙面的 Y-Z 坐标图(b)

根据文献[13-14]中描述的模型,由侧壁粗糙度导致的散射损耗系数 $\alpha_{\mathrm{cm}^{-1}}$ 如式(2):

$$\alpha_{\mathrm{cm}^{-1}}=\varphi(d)^2(n_1^2-n_2^2)^2\cdot\frac{k_0^3}{4\pi n_1}\int_0^{\pi}\widetilde{R}(\beta-n_2k_0\cos\theta)\cdot\mathrm{d}\theta \tag{2}$$

式中,d 为波导半宽度,$\varphi(d)$为波导边界的模场分布,n_1 为芯层折射率,k_0 为真空波矢,$\widetilde{R}(\Omega)$为功率谱密度函数,且 $\Omega=\beta-n_2k_0\cos\theta$,其中 θ 为与波导中心轴相关的散射角。$\widetilde{R}(\Omega)$考虑到所有由粗糙度引起的空间频率,表示如式(3):

$$\widetilde{R}(\Omega)=\int_{-\infty}^{\infty}R(u)\exp(\mathrm{i}\Omega u)\mathrm{d}u \tag{3}$$

其中，$R(u)$为自相关函数，用来大致估计 $f(z)$与 $f(z-u)$的相关度，如式(4)：

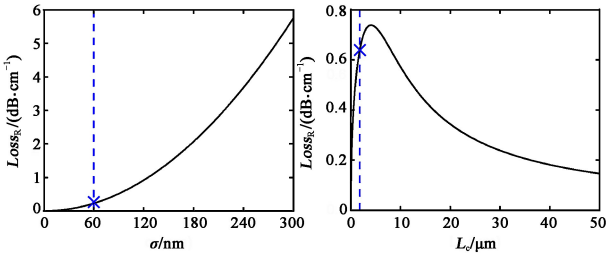
$$R(u)=\sigma^2\exp\left(-\frac{|u|}{L_c}\right) \tag{4}$$

其中，σ 为均方根且 $\sigma^2=R(0)$，当 $R(u)$下降到它最大值的 $1/e$ 时的横坐标即为相关长度 L_c。根据式(2)、(3)、(4)，由粗糙度引入的单位长度的散射损耗(单位为 dB/cm)如式(5)：

$$Loss_R=4.343\frac{\sigma^2}{k_0\sqrt{2}d^4n_1}g(V)\cdot f(x,\gamma) \tag{5}$$

其中，$g(V)$和 $f(x,\gamma)$为复函数，具体定义详见文献[14]；L_c 和 σ 可以近似理解为扰动函数的振动周期和幅度。当 L_c 为无限大时表示芯层与包层间没有粗糙度。需要注意的是，该计算中只包含了基模的散射损耗。

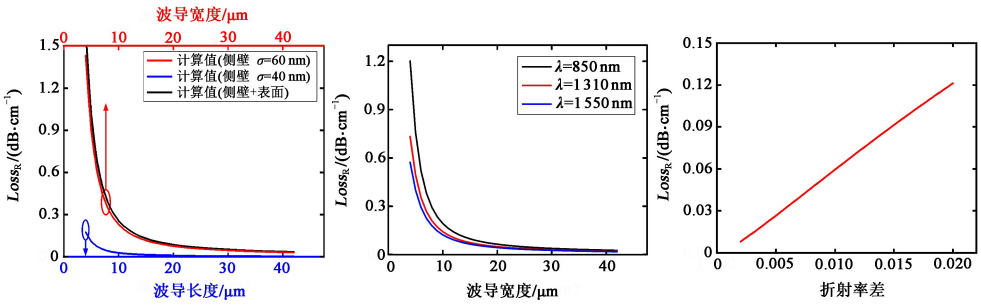
在 850 nm 波长下，将 n_1 和 n_2 分别设为 1.532 和 1.512，该初始条件与实验条件相一致。波导宽度 $2d$ 设为 10 μm。由于侧壁粗糙度约为上下表面粗糙度的 3 倍，因此优先考虑侧壁粗糙度的影响，用式(5)来计算 σ 和 L_c 对 $Loss_R$ 的影响。计算结果如图 2 所示，在图中用蓝色叉号标记出了后续实验测得的侧壁粗糙度 σ 和 L_c。$Loss_R$ 与 σ^2 成正比，随着 L_c 增加而增加并在 L_c=4.07 μm 时达到最大值，此后随着 L_c 的增加而降低。在此条件下，如果希望侧壁粗糙度引入的 $Loss_R$ 小于 0.1 dB/cm，则 σ 应小于 40 nm。



(a) $Loss_R$-σ (b) $Loss_R$-L_c

图 2 $Loss_R$ 的计算值与 σ 及 L_c 的相关度

通过式(5)计算波导宽度、工作波长和折射率差对 $Loss_R$ 的影响。表 1 为主要计算参数。图 3(a)所示为波导宽度对 $Loss_R$ 的影响。通过后续实验测得的波导侧壁和上下表面的 σ 和 L_c 来计算 $Loss_R$。侧壁的 σ 和 L_c 分别为 60 nm 和 1.79 μm，上下表面的 σ 和 L_c 分别为 20 nm 和 2.21 μm。可以观察到 $Loss_R$ 随波导宽度的增加而减小。这种相关性可以解释为 $Loss_R$ 依赖于同一工作波长下波导芯/包层界面的模场功率交叠，相关于式(2)中的 $\varphi(d)$。因此，具有更大比例模场功率交叠的较窄波导会有更大的散射损耗。此外，由于 $Loss_R$ 与 σ 的平方成正比，由侧壁粗糙度引起的 $Loss_R$ 远大于由上下表面粗糙度引起的 $Loss_R$，如式(5)所示。当 L_c 相同时，由于 σ 差 3 倍，因此 σ^2 差 9 倍。图 3(b)所示为工作波长对 $Loss_R$ 的影响。尽管 $Loss_R$ 随着波长的增加而减小，工作在长波长(如 1 310 或 1 550 nm)、宽度小于 10 μm 波导的 $Loss_R$ 仍然无法忽略。图 3(c)则展示了折射率差对 $Loss_R$ 的影响。当波导宽度为 10 μm 时，$Loss_R$ 随着折射率差增大几乎线性增长。



(a) 波导宽度 (b) 工作波长 (c) 折射率差

图 3 $Loss_R$ 的计算值与波导宽度、工作波长和折射率差的关系

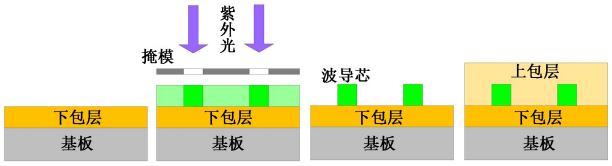
表 1 主要计算参数

参数	值
波长/nm	850
芯层折射率	1.532
包层折射率	1.512
粗糙度 σ/nm	60
相关长度 L_c/μm	1.79
波导宽度/μm	4～40

2 实验结果与分析

我们基于标准光刻工艺，使用商用的紫外固化型树脂作为波导芯层(NTT-AT E3135)和包层(NTT-AT E3129)材料来制备聚合物光波导，并用于实验研究 $Loss_R$。在温度为 25 ℃时，芯层和包层

的黏度分别为 2 900 和 2 200 mPa·s。UV 固化后的波导的芯层和包层的折射率分别为 1.532 和 1.512。波导高度为 10 μm，宽度变化范围为 6～40 μm。制备流程如图 4 所示，制备工艺在 21 ℃和小于 40%的相对湿度下进行。



(a)　旋涂　(b)　曝光　(b)　湿法刻蚀　(c)　旋涂

图 4　光刻示意图

基板为 100 mm×100 mm×0.5 mm 的 FR-4 板。首先，将 50 μm 厚的包层材料旋涂在基板上，紫外光固化 8 min，再在 80 ℃下烘烤 15 min。然后，旋涂 10 μm 厚的波导芯层，通过掩模版对其进行 70 s 的紫外曝光并在 80 ℃下烘烤 1 min，在丙酮中浸泡 30 s 进行显影，再用氮气吹干后即可形成芯层图案。之后，旋涂 50 μm 厚的上包层并紫外固化 8 min。最后，将制备好的波导烘烤 10 min。

在相同的实验条件下，制备了不含上包层的波导，并将其用于粗糙度测试。为了最大限度地避免损坏波导的芯/包层界面的原始形貌，采用切割刀片厚度仅为 25 μm 的切割机(ADT7100)在距离波导侧壁约 200～300 μm 的位置切割基板，波导侧壁的切割示意图如图 5 所示。切割距离波导的位置应尽可能远，以减小对波导原始形貌的改变，同时也要保证切割之后波导的侧壁和基板的距离在显微镜的焦距范围以内。用乙醇清洗波导，并用氮气吹干。最后，使用激光共聚焦显微镜观察波导的形貌，并测量波导上下表面与侧壁的 σ 和 L_c。

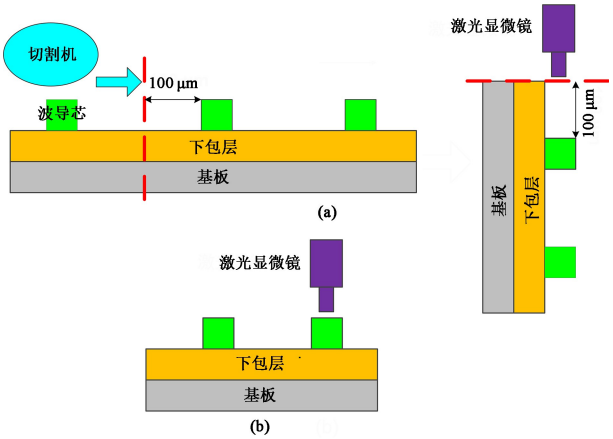
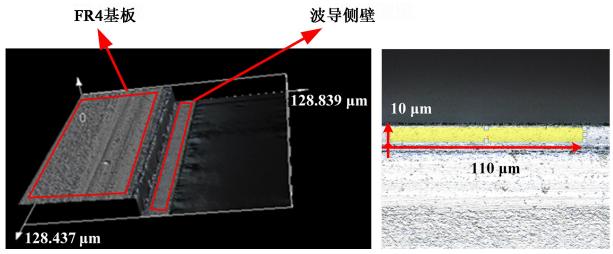


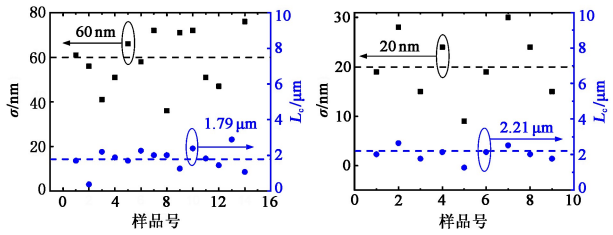
图 5　(a)测量波导侧壁粗糙度；(b)测量波导上包层粗糙度的示意图

图 6(a)展示了无上包层的波导的三维剖面图。一个测量侧壁粗糙度的样本区域用长为 110 μm、宽为 10 μm 的黄框标出，如图 6(b)所示。图 7 为测量结果。当 L_c 阈值为 $1/e$ 时，测得的侧壁和上下表面的 σ 与 L_c 的平均值分别为 60 nm/1.79 μm 和 20 nm/2.21 μm。侧壁和上下表面的 σ 范围分别为 40～80 nm 和 10～30 nm。



(a)　(b)

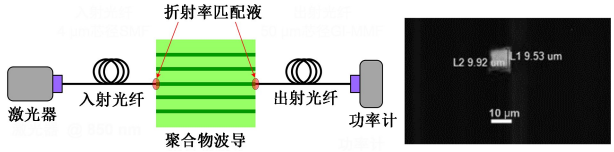
图 6　(a)波导侧壁的三维轮廓；(b)一个测量侧壁粗糙度的样本区域



(a)　(b)

图 7　(a)测得的波导侧壁的 σ 和 L_c；(b)测得的波导上下表面的 σ 和 L_c

我们还测量了含上包层的波导的插入损耗，实验装置如图 8(a)所示。波导长为 8.0 cm。打磨过的端面的显微图如图 8(b)所示。制备的波导宽度范围为 6～40 μm，采用一根芯径为 4 μm 的单模光纤(HI-780)将 850 nm 激光器发出的光耦合进波导，波导输出端使用多模渐变折射率光纤 OM3 耦合并连接到功率计。在波导端面使用了折射率匹配液以最大程度地减小耦合损耗。实验中通过计算多组波导插入损耗的平均值来减小测量误差。



(a)　(b)

图 8　(a)测量插入损耗的实验装置示意图；(b)波导打磨后的端面显微图片

在 850 nm 波长下测量了多个不同宽度波导的

散射损耗，实验结果如图 9 中的红色方块所示。每个红色方块代表了 8 个波导通道的散射损耗平均测量值。根据交叠积分，在波导尺寸小即散射损耗较大时，基模占据了绝大部分的光功率。因此之前的计算仿真适用于描述本实验数据。在 L_c 均为 1.79 μm 的情况下，分别计算得到了侧壁粗糙度 $\sigma=40$ nm，$\sigma=60$ nm 和 $\sigma=80$ nm 时的 $Loss_R$ 曲线。当波导宽度减小时，散射损耗增加。实验测量的散射损耗与计算值相吻合。为了制备 $Loss_R$ 小于 0.1 dB/cm 的聚合物波导，当侧壁粗糙度分别为 40 和 80 nm 时，波导宽度应大于 10 和 25 μm。当波导宽度大于 20 μm 时，$Loss_R$ 较小，但当波导宽度小于 10 μm 时，$Loss_R$ 迅速增加。值得指出的是，$Loss_R$ 的测量值还包括了材料吸收损耗和耦合损耗，$Loss_R$ 的测量值要比计算值大，且当波导宽度减小时，两者差异将增大。

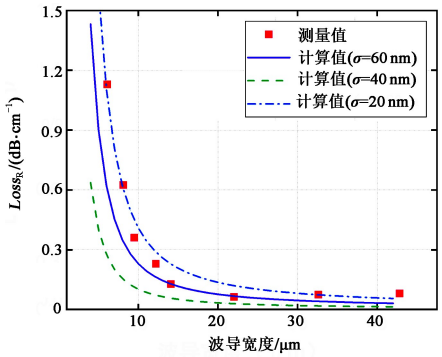
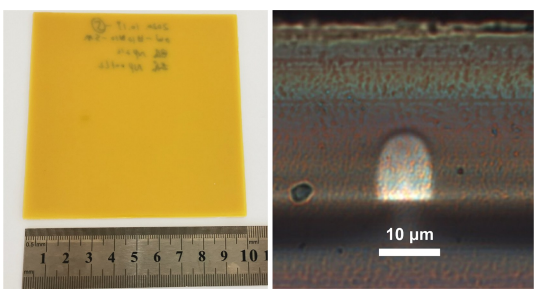


图 9 散射损耗与波导宽度的函数图

采用和多模波导相似的光刻工艺，设计制备了基于有机无机杂化材料的单模聚合物波导。根据上述理论结果，为了有效降低侧壁粗糙带来的 $Loss_R$，采用的单模材料具有相对更低的粘度(25 ℃时约 300 mPa·s)和更小的折射率差。其中波导芯层和包层在 1 310 nm 处的折射率分别为 1.573 和 1.561。制备的波导宽度为 10 μm，长度为 7 cm，波



(a) (b)

图 10 (a)制备得到的单模聚合物波导；(b)波导的端面显微图片

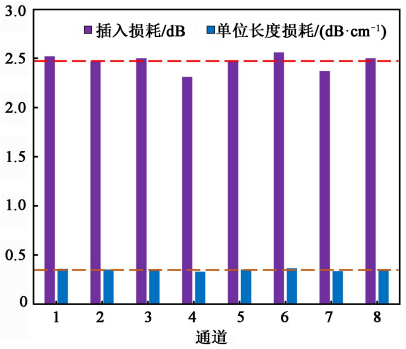


图 11 1 310 nm 波长处各波导通道的损耗

导间距为 250 μm。制备得到的波导板及波导端面如图 10 所示，其中波导宽度和高度分别为 9.4 和 10.4 μm。采用图 8 所示的测试系统，使用工作于 1 310 nm 的激光器测量了插入损耗，实验结果如图 11 所示，8 个通道的平均插入损耗为 2.46 dB，单位长度损耗小于 0.35 dB/cm。

3 结论

本文研究了波导芯与单模光纤纤芯尺寸相当的聚合物波导的粗糙度引入的散射损耗 $Loss_R$。采用基于耦合模理论的数值模型和波束传播法进行理论分析。主要分析了粗糙度、波导尺寸、工作波长和折射率差对 $Loss_R$ 的影响。使用共聚焦显微镜测量制备的波导侧壁和上下表面的粗糙度，实验结果显示侧壁平均粗糙度约 60 nm，为上下表面粗糙度的 3 倍。$Loss_R$ 主要受侧壁粗糙度的影响，且侧壁粗糙度引入的 $Loss_R$ 约为上下表面的 9 倍。基于上述理论和实验分析结果，制备了波导尺寸约 10 μm 的单模聚合物波导，其在 1 310 nm 处的 $Loss_R$ 小于 0.35 dB/cm。制备的单模波导作为光背板的关键传输媒质具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] Yoo S B. The role of photonics in future computing and data centers[J]. IEICE Trans. Commun., 2014, 97(7): 1272-1280.

[2] Kyriakis-Bitzaros E D, Haralabidis N, Lagadas M, et al. Realistic end-to-end simulation of the optoelectronic links and comparison with the electrical interconnections for system-on-chip applications[J]. J. Lightwave Technol., 2001, 19(10): 1532-1542.

[3] 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)：167-172.
Xu Xiao, Ma Lin, Zhang Wenjia, et al. Fabrication and performance evaluation of polymer waveguides for optical

printed circuit board applications[J]. ACTA Optica Sinica, 2016, 36(6): 167-172.

[4] 邓传鲁，王廷云，庞拂飞，等. 光背板互连技术研究进展[J]. 科技导报，2016，34(16)：90-98.
Deng Chuanlu, Wang Tingyun, Pang Fufei, et al. Research progress of optical interconnection technology on optical printed circuit boards[J]. Science & Technology Rev., 2016, 34(16): 90-98.

[5] Xu X, Ma L, Immonen M P, et al. Practical evaluation of polymer waveguides for high-speed and meter-scale on-board optical interconnects[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(16): 3486-3493.

[6] Immonen M P, Wu J, Yan H J, et al. Single-mode polymer waveguide PCBs for on-board chip-to-chip interconnects[C]// SPIE OPTO, 2017: 101090K.

[7] Kobayashi J, Matsuura T, Sasaki S, et al. Single-mode optical waveguides fabricated from fluorinated polyimides[J]. Appl. Opt., 1998, 37(6): 1032-1037.

[8] Takenobu S, Kuwana Y, Takayama K, et al. All-polymer 8×8 AWG wavelength router using ultra low loss polymer optical waveguide material (CYTOPTM)[C]// Optical Fiber Communications Conf. (OFC), Optical Society of America, 2008: JWA32.

[9] Kim E, Cho S Y, Yeu D M, et al. Low optical loss perfluorinated methacrylates for a single-mode polymer waveguide[J]. Chem. Mater., 2005, 17(5): 962-966.

[10] Yoshimura R, Hikita M, Tomaru S, et al. Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate[J]. J. Lightwave Technol., 1998, 16(6): 1030-1037.

[11] Zuo H, Yu S, Gu T, et al. Low loss, flexible single-mode polymer photonics[J]. Opt. Express, 2019, 27(8): 11152-11159.

[12] Mori T, Moriya K, Kitazoe K, et al. Polymer optical waveguide having unique refractive index profiles for ultra high-density interconnection [C]// 2012 Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC), Optical Society of America, 2012: 1-3.

[13] Xu X, Ma L, Jiang S L, et al. Circular-core single-mode polymer waveguide for high-density and high-speed optical interconnects application at 1 550 nm[J]. Opt. Express, 2017, 25(21): 25689-25696.

[14] Poulton C G, Koos C, Fujii M, et al. Radiation modes and roughness loss in high index-contrast waveguides[J]. IEEE J. Sel. Top. Quant., 2006, 12(6): 1306-1321.

[15] Lee K K, Lim D R, Luan H C, et al. Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO_2 waveguide: experiments and model[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(11): 1617-1619.

[16] Marcuse D. Theory of Optical Dielectric Waveguides[M]. 2nd Edition, 1991: 113-133.

作者简介：

庄语迪(1992—)，女，硕士，主要研究方向为光互连技术；

石　莹(1995—)，男，博士生，主要研究方向为新型光波导技术；

汤宁峰(1970—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向为高速光互连技术；

魏晓强(1974—)，男，硕士，教授级高级工程师，主要研究方向为光通信技术；

何祖源(1962—)，男，博士，讲席教授，主要研究方向为光传感及光互连技术。