

# 面向光印刷电路板的聚合物光波导制备及性能研究

徐 晓 马 麟\* 张 文 甲 杜 江 兵 何 祖 源

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** 选用紫外固化型环氧树脂,采用光刻技术在 FR-4 基板上制备了平行排布的多模聚合物光波导。波导具有阶跃折射率分布,相邻波导间隔为  $250\ \mu\text{m}$ ,可与并带后的  $50\ \mu\text{m}$  芯径多模光纤实现多通道低损耗耦合。通过搭建测试平台,对波导的插入损耗、串扰及错位容限进行了测量与分析。实验结果表明,所制备光波导的损耗小于  $0.05\ \text{dB/cm}$ ,串扰小于  $-60\ \text{dB}$ 。波导在错位容限方面性能良好,当输入端错位  $\pm 5\ \mu\text{m}$  时,系统增加的插入损耗小于  $0.2\ \text{dB}$ 。同时根据实际波导建立仿真模型,采用光束传播法分析了不同入射条件下的模式能量分布、差分模式延时及耦合效率。计算结果表明,使用与波导具有相近纤芯尺寸的人射光纤不仅可以减小耦合损耗和串扰,还能减少激发起的高阶模式数,提高波导的距离带宽积,优化光波导的综合传输性能。所制备的聚合物光波导作为组成光印刷电路板的核心光器件具有良好的应用前景。

**关键词** 集成光学; 聚合物光波导; 光刻技术; 传输损耗; 错位容限; 串扰

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0613001

## Fabrication and Performance Evaluation of Polymer Waveguides for Optical Printed Circuit Board Applications

Xu Xiao Ma Lin Zhang Wenjia Du Jiangbing He Zuyuan

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

**Abstract** Polymer optical waveguides are fabricated on FR-4 substrates with UV-curable epoxy resins by the lithography method. The experiment results show that the typical loss and the crosstalk of the waveguides are less than  $0.05\ \text{dB/cm}$  and  $-60\ \text{dB}$ , respectively. Moreover, the waveguides exhibit good misalignment tolerance. When there is a misalignment of  $\pm 5\ \mu\text{m}$  at the input end, the increased insertion loss is less than  $0.2\ \text{dB}$ . A simulation model based on beam propagation method is used to investigate the mode power distribution, differential mode delay, and dependence of coupling efficiency on the launching conditions. The results indicate that using a fiber with core diameter comparable with the size of the waveguide excites fewer higher order modes and largely improves the waveguide performance. The fabricated optical polymer waveguides are promising as key devices for optical printed circuit board applications.

**Key words** integrated optics; polymer waveguide; lithography technology; propagation loss; misalignment tolerance; crosstalk

**OCIS codes** 130.0250; 250.5460; 160.3130

## 1 引 言

随着数据中心及高性能计算机数据处理速度的不断增加,短距互连系统对带宽的需求急剧增长。相比于电互连,光互连由于其带宽大、互连密度高、功耗小、成本低以及抗电磁干扰性强等特点,正逐渐向短距互

**收稿日期:** 2016-02-02; **收到修改稿日期:** 2016-02-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(61405113)、上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”(15511103100)

**作者简介:** 徐 晓(1992-),女,博士研究生,主要从事光互连及光波导方面的研究。E-mail: xiao2014@sjtu.edu.cn

**导师简介:** 何祖源(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感及光互连方面的研究。

E-mail: zuyuanhe@sjtu.edu.cn

\* **通信联系人。** E-mail: ma.lin@sjtu.edu.cn

连领域渗透<sup>[1-4]</sup>。

近年来,集成了光波导及光收发器件的光印刷电路板(OPCB)实现了模块间及芯片间的高速通信,成为短距互连领域的研究热点<sup>[5-6]</sup>。基于OPCB的光互连系统由刀片板和背板组成<sup>[7]</sup>。刀片板上集成芯片、光收发器件及波导,实现芯片间互连;背板上集成波导,用于刀片板之间的互连。刀片板和背板之间通过光连接器连接。光波导作为互连通信的媒质,成为板级互连系统中的关键器件。可与印刷电路板(PCB)集成的波导主要有光纤<sup>[8-9]</sup>、硅基光波导<sup>[10-12]</sup>以及聚合物波导<sup>[13-14]</sup>等。尽管光纤埋线的方式可以实现远距离、低损耗、高速的数据传输,但其集成密度有限,且不适于大规模生产。硅基光波导可以与其他硅基器件单片集成,但是受限于硅片尺寸,硅基光波导长度有限,不适于制备大尺寸的背板系统。先进的聚合物光波导不仅传输损耗低、互连密度高,而且制备工艺与传统光刻工艺兼容,适于大规模生产。由于材料具有良好的热稳定性,聚合物波导可以在高温环境下通过层压技术直接与PCB集成<sup>[15]</sup>。然而在光背板系统中,当互连距离需求达到几十厘米或更长,数据传输速率超过25 Gb/s时,由波导的多模特性引起的模式间色散成为一个值得关注的问题。国际上有数家科研机构就如何提高多模聚合物波导的性能开展了广泛的研究<sup>[16-19]</sup>。

本文选用紫外固化型环氧树脂,采用光刻技术,在FR-4基板上制备了低损耗的多模聚合物光波导,在显微镜下测试了光波导的纤芯尺寸和间距,并搭建实验系统对光波导的插入损耗、错位容限及串扰进行了测试。同时采用光束传播法(BPM)分析了不同入射条件下波导的距离带宽积<sup>[20]</sup>及耦合效率。

## 2 波导的制备

采用相对折射率差 $\Delta=1.63\%$ 的两种紫外固化型环氧树脂作为波导芯层和包层材料,通过紫外光刻技术在FR-4基板上制备了平行排布的多模聚合物波导。制备过程如图1所示。

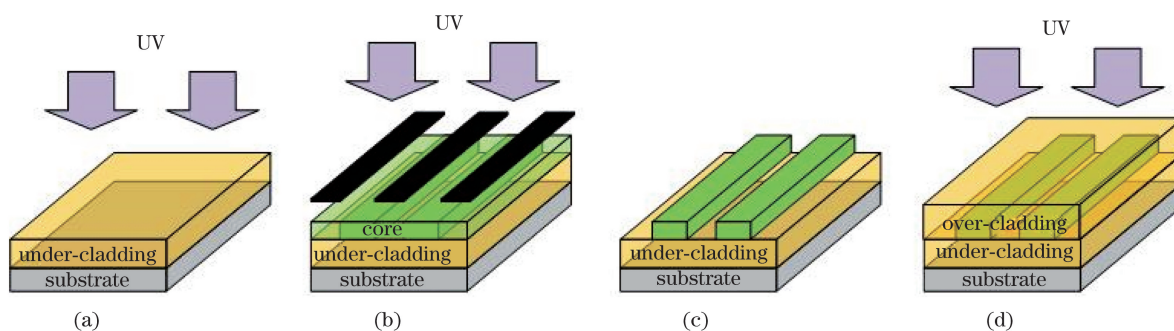


图1 波导制作流程。(a)下包层;(b)芯层;(c)刻蚀;(d)上包层

Fig. 1 Schematic of fabrication process. (a) Under-cladding; (b) core; (c) etching; (d) over-cladding

首先,在FR-4基板上旋涂低折射率材料,经过紫外固化及适当加热形成下包层,如图1(a)所示。然后,在下包层上旋涂高折射率树脂作为芯层,通过掩模板进行紫外光刻,如图1(b)所示。根据芯层材料的粘度对旋涂时间及旋涂速度进行控制,可以改变芯层的厚度,通过控制曝光时间及曝光间隙可以对芯层宽度进行控制。接下来,用丙酮对芯层进行刻蚀,如图1(c)所示。经过掩模板的紫外曝光过程,被照射部分的单体交联发生聚合,形成难溶于丙酮的聚合物。在丙酮的刻蚀过程中,未被紫外光照射的部分溶于丙酮,得到需要的波导图形。最后,再次旋涂低折射率树脂作为上包层,对波导整体进行完全的紫外固化,并适当加热,如图1(d)所示。

实验制备的多模聚合物光波导为多根矩形波导芯平行排列,如图2所示。根据实验所用掩模版,光刻一次制备的波导数目为60条。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 插入损耗

通过搭建实验系统,对长度为8 cm的聚合物波导的损耗进行了测试。光源采用850 nm垂直腔面发射激光器(VCSEL, VIS公司,德国)。通过纤芯直径为50  $\mu\text{m}$ 的渐变折射率(GI)多模光纤(MMF)将光耦合

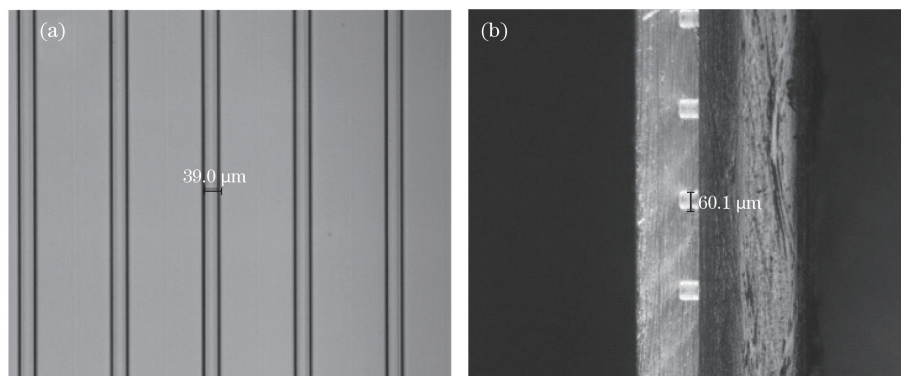


图 2 多模聚合物光波导。(a)俯视图;(b)剖面图

Fig. 2 Micrographs of fabricated multimode polymer waveguides. (a) Top view; (b) cross-sectional view

进波导,输出光用具有大收光孔径的空间功率计进行接收。在入射光纤与波导输入端之间使用了折射率匹配液,以最大程度地减小耦合损耗。实验测得波导插入损耗的典型值是 0.44 dB,即 0.05 dB/cm。值得注意的是,这包含了波导的传输损耗以及耦合损耗,因此所制备波导的传输损耗应小于 0.05 dB/cm。

### 3.2 错位容限

搭建如图 3 所示的实验系统,对波导的错位容限进行了测量。使用与上述插入损耗测试相同的方法将光直接耦合进入待测光波导中,在输出端用纤芯直径为 62.5 μm 的渐变折射率光纤进行接收。保持输出端的最佳耦合,入射光纤沿水平方向扫描,扫描步长为 0.5 μm,并用功率计探测输出端光功率的变化。选用了两种不同芯尺寸的波导,其中,波导 1 的芯层尺寸为 50.0 μm×58.0 μm,波导 2 的芯层尺寸为 57.3 μm×60.2 μm。两波导在入射端的错位容限曲线及剖面图如图 4 所示,可以看出,波导芯尺寸较大的波导错位容限略大。当输入端错位±5 μm 时,系统增加的插入损耗小于 0.2 dB。

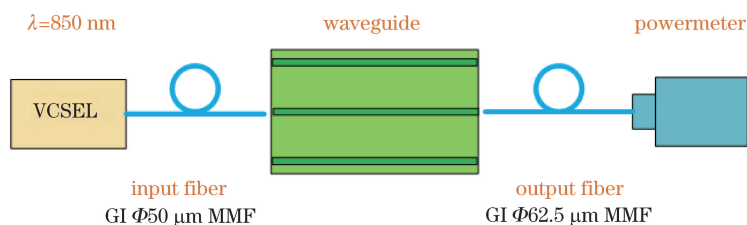


图 3 实验框图

Fig. 3 Experimental setup

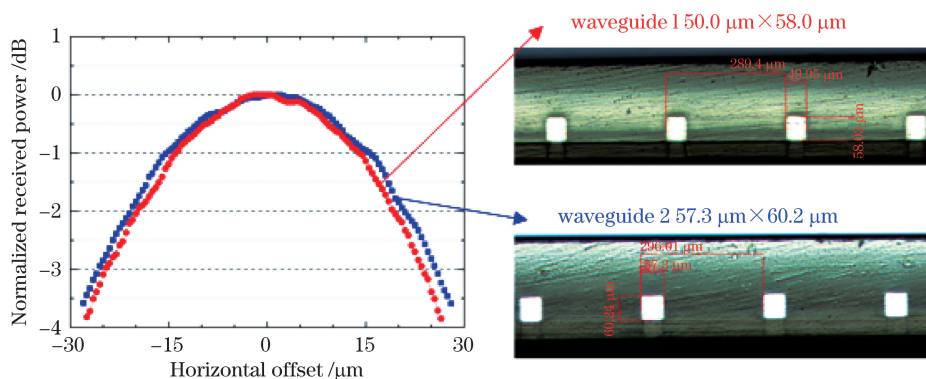


图 4 波导 1 和波导 2 的错位容限曲线及剖面图

Fig. 4 Misalignment tolerance and cross-sectional micrographs of waveguide 1 and waveguide 2

### 3.3 串扰

阶跃折射率分布多模聚合物光波导之间的串扰主要来源于模式耦合和模式转换<sup>[21]</sup>。模式耦合是指当两根相互平行的光波导临近时,波导中的模式在传输过程中发生相互耦合而在波导之间产生功率交换。但

本文制备的波导芯的间距为  $250\ \mu\text{m}$ , 因此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。

对波导的串扰进行了测量, 实验系统如图 3 所示。保持输入端的最佳耦合, 输出端的接收光纤沿水平方向扫描, 并用功率计探测不同位置的光功率, 扫描步长为  $10\ \mu\text{m}$ 。实验结果如图 5 所示。其中, 入射波导芯 (Ch.2) 的输出光功率为  $8.4\ \text{dBm}$ , 所用功率计探测下限为  $-50\ \text{dBm}$ , Ch.1 和 Ch.3 是 Ch.2 左右两边的两个相邻波导芯。当探测光纤错位距离大于  $170\ \mu\text{m}$  时, 功率计接收的光功率小于  $-50\ \text{dBm}$ 。由此可知, 波导的串扰小于  $-60\ \text{dB}$ , 这表明实验制备波导的侧壁光滑, 散射进入包层区域的光较少。

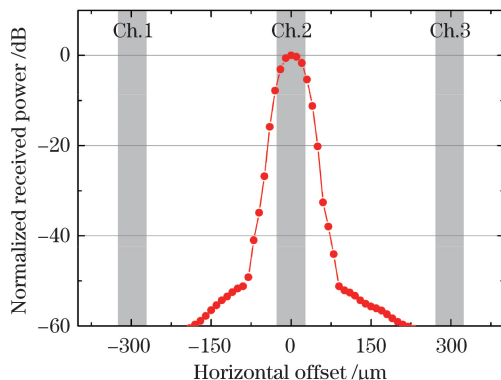


图 5 串扰性能

Fig. 5 Crosstalk property

### 3.4 不同入射条件下的传输性能分析

多模聚合物波导的带宽主要由差分模式延时 (DMD) 表征。差分模式延时不仅受到波导折射率分布的影响, 还受到入射条件的影响<sup>[22]</sup>。在特定入射条件下, 模式能量分布 (MPD) 决定了波导中激发的模式数, 进而决定了波导的差分模式延时。

参照实际波导建立仿真模型, 采用光束传播法分析了不同入射条件下的模式能量分布和差分模式延时。其中, 波导芯尺寸为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ , 入射光纤为渐变折射率多模光纤, 纤芯直径从  $10\ \mu\text{m}$  增加到  $62\ \mu\text{m}$ 。为了简化模型, 假设只有基模光从波导输入端的中心位置入射。在分析模式能量分布时, 忽略了所有能量低于最高能量 1% 的高阶模式。模式能量分布 (激发的各阶模式的能量占入射光能量的比例) 与入射光纤纤芯直径的关系如图 6 所示。由图 6 可知, 随着入射光纤芯径的增加, 激发的波导模式更加集中于低阶模式, 这是因为, 根据模场匹配理论<sup>[23]</sup>, 入射的基模光斑尺寸越大, 入射场与波导中高阶模式的交叠积分越小, 因此有更多的能量耦合到波导的低阶模式中。

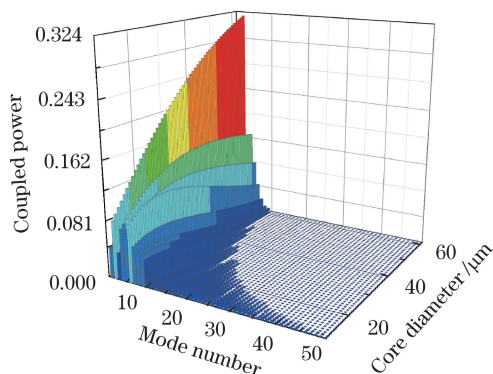


图 6 不同入射条件下的模式能量分布

Fig. 6 Mode power distribution under different launching conditions

由图 6 得到的最高阶模式计算不同入射条件下的差分模式延时及波导的距离带宽积, 计算结果如图 7 所示。随着入射光纤的纤芯直径从  $10\ \mu\text{m}$  增加到  $62\ \mu\text{m}$ , 激发的高阶模式数减少, 差分模式延时减小, 距离带宽积从  $27\ \text{GHz} \cdot \text{m}$  增加到  $173\ \text{GHz} \cdot \text{m}$ 。然而, 受限于光纤-波导系统的耦合损耗, 入射光纤的芯径不能过

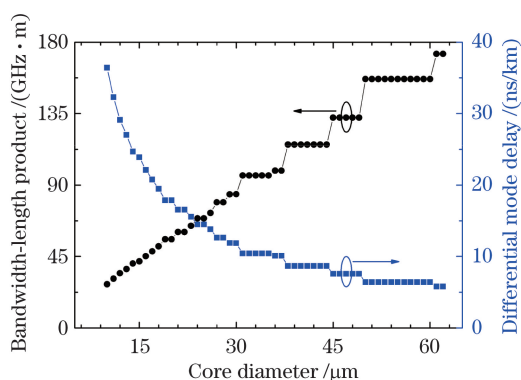


图 7 不同入射条件下的差分模式延时及距离带宽积  
Fig. 7 Differential mode delay and bandwidth-length product on different launching conditions

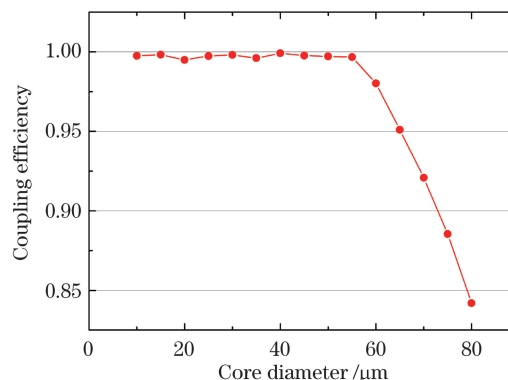


图 8 不同入射条件下的光纤-波导系统耦合效率  
Fig. 8 Coupling efficiency of fiber-waveguide system on different launching conditions

大。按照上述仿真模型,对不同入射条件下系统的耦合效率进行了仿真分析,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,当入射光纤的纤芯尺寸大于波导的尺寸时,系统的耦合损耗明显增加。此时入射到包层中的能量对相邻波导芯传输性能的影响加重。仿真结果表明,使用与波导尺寸相近的入射光纤不仅可以减小耦合损耗和串扰,还能减少激发起的高阶模式数,提高波导的距离带宽积,优化光波导的综合传输性能。

## 4 结 论

本文选用紫外固化型环氧树脂,采用光刻工艺,制备了损耗小于 0.05 dB/cm 的多模聚合物光波导。搭建实验系统对波导的串扰及错位容限进行了测量。实验结果表明波导的串扰小于 -60 dB。当输入端错位  $\pm 5 \mu\text{m}$  时,系统增加的插入损耗小于 0.2 dB。采用光束传播法分析了不同入射条件下的距离带宽积及耦合效率。计算结果表明,使用与波导具有相近纤芯尺寸的入射光纤不仅可以减小耦合损耗和串扰,还能提高波导的距离带宽积,优化光波导的综合传输性能。实验所制备的聚合物光波导性能良好,作为组成光印刷电路板的核心光器件具有良好的应用前景。

**致谢:**感谢云南师范大学王书荣教授在波导制备技术方面给予的指导与帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Miller D A B. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips[J]. Proc IEEE, 2000, 88(6): 728-749.
- 2 Huang D, Sze T, Landin A, *et al.*. Optical interconnects: Out of the box forever?[J]. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2003, 9(2): 614-623.
- 3 Kyriakis-Bitaros 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.
- 4 Jia Nana, Deng Chuanlu, Pang Fufei, *et al.*. Research on excimer laser etching technology for achieving optical waveguide end face[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303012.  
贾娜娜, 邓传鲁, 庞拂飞, 等. 光波导端面的准分子激光刻蚀技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303012.
- 5 Schares L, Kash J A, Doany F E, *et al.*. Terabus: Terabit/second-class card-level optical interconnect technologies[J]. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2006, 12(5): 1032-1044.
- 6 Glebov A L, Lee M G, Yokouchi K. Integration technologies for pluggable backplane optical interconnect systems[J]. Opt Eng, 2007, 46(1): 015403.
- 7 Immonen M, Wu J, Yan H J, *et al.*. Electro-optical backplane demonstrator with multimode polymer waveguides for board-to-board interconnects[C]. ESTC, Helsinki, 2014: 1-6.
- 8 Pitwon R, Worrall A, Stevens P, *et al.*. Demonstration of fully enabled data center subsystem with embedded optical interconnect[C]. SPIE, 2014, 8991: 899110.
- 9 Chujo N, Nomura R, Yazaki T, *et al.*. 7.2-Tb/s compact optical backplane using ribbon fiber sheet and high-density

- connector[C]. Optical Interconnects Conference, San Diego, 2014: 93-94.
- 10 Lipson M. Guiding, modulating, and emitting light on silicon-challenges and opportunities[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(12): 4222-4238.
- 11 Boeuf F, Fulbert L, Baudot C, *et al.*. Silicon photonics research for CMOS compatible optical interconnects at 40 Gb/s and beyond[C]//2012 International Semiconductor Conference Dresden-Grenoble (ISCDG), 2012: 87-91.
- 12 Cui Rong, Yang Xiaohong, Lü Qianqian, *et al.*. InGaAs/InP photodetector on SOI circuitry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110003.  
崔 荣, 杨晓红, 吕倩倩, 等. SOI 波导与 InGaAs/InP 光电探测器的集成[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110003.
- 13 Doany F E, Schow C L, Baks C W, *et al.*. 160 Gb/s bidirectional polymer-waveguide board-level optical interconnects using CMOS-based transceivers[J]. IEEE Trans Adv Packag, 2009, 32(2): 345-359.
- 14 Dou X, Wang A X, Lin X, *et al.*. Photolithography-free polymer optical waveguide arrays for optical backplane bus[J]. Opt Express, 2011, 19(15): 14403-14410.
- 15 Ma H, Jen A K-Y, Dalton L R. Polymer-based optical waveguides: Materials, processing, and devices[J]. Adv Mater, 2002, 14(19): 1339-1365.
- 16 Chen J, Bamiedakis N, Vasilev P, *et al.*. High-bandwidth and large coupling tolerance graded-index multimode polymer waveguides for on-board high-speed optical interconnects[J]. J Lightwave Technol, 2015, PP(99): 1.
- 17 Bamiedakis N, Beals J, Penty R V, *et al.*. Cost-effective multimode polymer waveguides for high-speed on-board optical interconnects[J]. IEEE J Quantum Electron, 2009, 45(4): 415-424.
- 18 Suzuki K, Ishigure T. Fabrication for high-density multilayered GI circular core polymer parallel optical waveguides[C]. IEEE, Optical Interconnects Conference, San Diego, 2015: 86-87.
- 19 Wen Changli, Xu Rong, Men Tao, *et al.*. Rotation elimination and evaluation of length of measuring images without damage of polysiloxane waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0612005.  
温昌礼, 徐 蓉, 门 涛, 等. 聚硅氧烷光波导损耗无损测量图像的消旋及尺寸估计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0612005.
- 20 Keiser G. Optical fiber communications (3rd edition)[M]. New York: McGraw Hill, 2003: 104-106.
- 21 Kudo T, Ishigure T. Analysis of inter-channel crosstalk in multi-mode parallel optical waveguide using beam propagation method[C]. CPMT Symposium Japan, 2012 2nd IEEE, Kyoto, 2012: 1-4.
- 22 Freund R E, Bunge C-A, Ledentsov N N, *et al.*. High-speed transmission in multimode fibers[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(4): 569-586.
- 23 Gu Dongxu. Study on the end-coupling of optical fiber and waveguide device[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 5-13.  
谷东旭. 波导器件与光纤端面耦合问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 5-13.