

用于光互连的聚硅氧烷波导弯曲损耗

冯向华^{1,2} 季家镛¹ 窦文华³

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

摘要 研究了用于光互连的聚硅氧烷多模光波导直接弯曲时弯曲损耗与圆弧曲率半径的关系。用 Marcuse 的直波导近似法理论计算了其弯曲损耗, 理论计算表明弯曲损耗随模阶数的增加而变大, 随半径的减少而变大; 光在波导中传输时, 总弯曲损耗出现阶跃式变化, 并且曲率半径大于 4 mm 时, 波导的弯曲损耗小于 1 dB/cm。用 BeamPROP 仿真软件仿真了 5、10、20 mm 三种曲率半径下的传输光场情况。利用数字化散射法测量了其弯曲损耗, 实验结果显示曲率半径在 5~6 mm 时弯曲损耗值在 0.55~0.8 dB/cm 之间, 考虑所制备的聚硅氧烷直波导固有的传输损耗, 实验值与理论值基本相符。

关键词 光纤光学; 光互连; 聚硅氧烷波导; 弯曲损耗; 数字化散射法

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0823003

Bending Loss of Polysiloxane Optical Waveguides for Optical Interconnection

Feng Xianghua^{1,2} Ji Jiarong¹ Dou Wenhua³

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

Abstract The relation between bending loss and curvature radius of the directly curved polysiloxane multimode optical waveguide for optical interconnection is analyzed. The bending loss is computed by using the Marcuse straight waveguide approximation method. The theoretical analysis indicates that the bending loss increases with the order of the mode and decrease-with the radius; the total bending loss transmitting in waveguide exhibits step changes. When the radius is larger than 4 mm, the bending loss is less than 1 dB/cm. The transmitting optical field is simulated by using the BeamPROP software under three different radius 5 mm, 10 mm and 20 mm, respectively. The bending loss is also measured by using digital scattering method. Experimental results indicate that the optical bending loss is between 0.55~0.8 dB/cm when curvature radius is between 5~6 mm, which agree with the theory in view of inherent propagation loss of the prepared polysiloxane straight waveguide.

Key words fiber optics; optical interconnection; polysiloxane waveguide; bend loss; digital scattering method

OCIS codes 230.7370; 130.5460; 200.4650; 310.2790

1 引言

有机聚合物光波导具有易集成、响应快速和成本低廉等一系列优点而成为近年来研究的热点, 聚硅氧烷光波导高度的温度稳定性及其在 850 nm 的

互联波长窗口具有的高透明性, 使其成为光互连的首选之一^[1~4]。在光互连中, 光路方向的改变不可避免, 如光波导延迟线^[5,6]、层与层之间的垂直耦合^[7]等, 而光路方向的改变往往涉及到波导的弯曲。

收稿日期: 2012-03-06; 收到修改稿日期: 2012-03-28

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和光互联器件应用等方面的研究。

E-mail: fengxianghua2002@hotmail.com

常用的波导弯曲有直接弯曲和 S 型弯曲,棱镜辅助弯曲、切向弯曲和多段弯曲^[8~11]等,因此分析光在弯曲波导中的传输特性,能为集成光波导器件的设计提供好的方法和依据。

波导的弯曲不可避免地引入辐射损耗,波导的弯曲损耗受材料折射率、波导的尺寸和弯曲半径等多种因素的影响。由于用于光互连的聚合物光波导截面较大,传输的模式较多,其弯曲损耗与传输单模的波导差别较大。近年来研究聚合物单模波导和小截面波导弯曲损耗的文章较多^[6,11],研究大截面多模波导^[12]的理论和实验的报道不多见。本文基于本实验室所制备的聚硅氧烷大截面多模光波导^[13,14],考虑纯弯曲损耗的情况,利用 Marcuse 的直波导近似法理论计算了弯曲损耗随不同曲率半径的变化情况,用 BeamPROP 仿真软件仿真了不同曲率半径下的传输光场情况。并在所制备的波导直接弯曲的情况下,利用数字化散射法测量了其弯曲损耗,得到的实验数据与理论值基本符合。

2 弯曲损耗理论分析

波导发生弯曲时,不考虑波导的结构缺陷等引入的损耗,仅基于弯曲本身,考虑在具有连续弯曲形状变化弯曲波导中,由于光波传播方向的改变而引起的光波损耗。

弯曲矩形聚合物波导及其采用的坐标系如图 1 所示,由于所考虑的波导芯包层折射率差值较大,按有效折射率法近似认为 y 方向场不变, x 方向弯曲,只考虑 x 方向场分布。

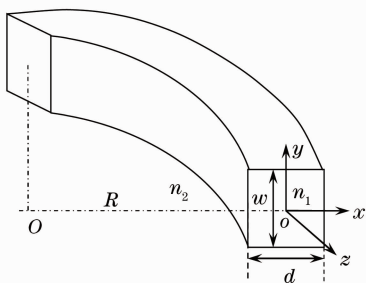


图 1 弯曲矩形聚合物波导及其坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bended rectangular polymer waveguide and its coordinate frame

采用 Marcuse 的直波导近似法理论^[15],在弯曲半径足够大的情况下,用直波导相应区域的场代替弯曲波导外侧附近区域的场。由直波导近似法,单位长度弯曲损耗系数可以表示为^[16]

$$\alpha(R) = c_1 \exp(-c_2 R), \quad (1)$$

式中 R 为弯曲段的曲率半径,系数 c_1 、 c_2 与 R 无关,由相应的直波导相关参数决定^[15]。计算所用参数为本实验室所制备波导的实际参数:光源波长为 $0.85 \mu\text{m}$,包层折射率为 1.41,芯层折射率为 1.543,波导厚度 $40 \mu\text{m}$,波导宽度 $70 \mu\text{m}$ 。计算表明 c_1 、 c_2 随有效折射率变化幅度非常大。图 2 为 c_2 随有效折射率变化情况,高阶模和低阶模系数差距较大。

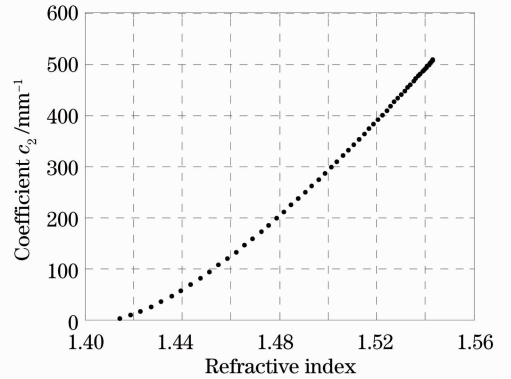


图 2 系数 c_2 随有效折射率的变化

Fig. 2 Coefficient c_2 versus the effective refractive index

由于波导内传输多模,且高阶模和低阶模的系数不同,所以不同阶模的弯曲损耗不同,图 3 为所计算部分的 TE 模,从右至左为高阶模到低阶模弯曲损耗随半径变化的情况。由于随着模式阶数的增加有效折射率降低, c_1 、 c_2 随模式阶数和曲率半径发生变化,弯曲损耗随模式阶数的增加而变大,随半径的减少而变大。在结构参数与工作波长相同的情况下,同一阶 TM 模的有效折射率较 TE 模的有效折射率要略小,所以 TM 模的弯曲损耗略大于 TE 模的弯曲损耗。

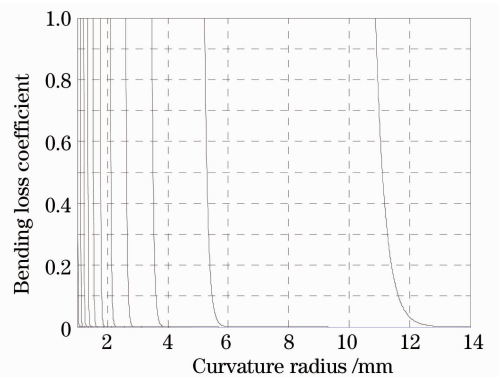


图 3 弯曲损耗系数 α 随曲率半径的变化

Fig. 3 Bending loss coefficient α versus curvature radius

考虑一段弯曲波导,将此段波导分割为由一段段小波导组成,由于曲率半径不变,每小段波导的弯曲损耗相同,所以整段波导的功率损耗系数为小段波导损耗累加得到

$$\alpha_T = \int_0^l \alpha(R) ds = \int_0^l \alpha(R) \sqrt{1+y'^2} dx, \quad (2)$$

对不同曲率半径,可计算出这段波导所有模式的总功率损耗。这段波导的弯曲功率损耗表示为

$$P = P_0 \exp(-\alpha_T), \quad (3)$$

$$L = 10 \lg \frac{P_0}{P} / l. \quad (4)$$

由(2)~(4)式可计算出弯曲损耗随半径的变化情

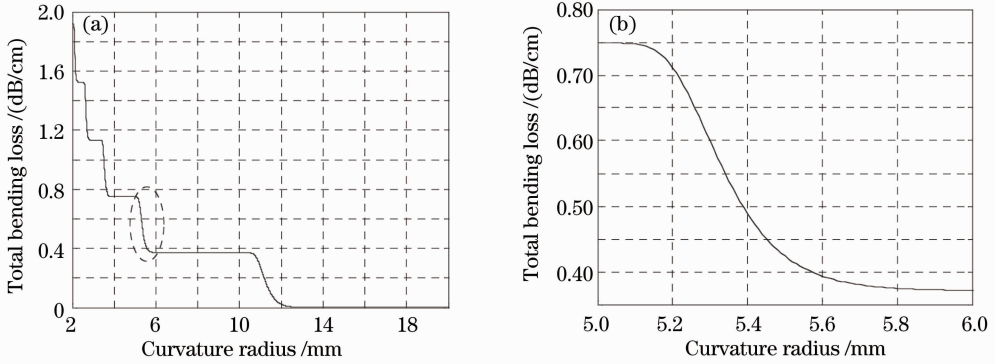


图4 (a)总弯曲损耗随曲率半径的变化;(b) (a)中椭圆虚线框所示部分的放大图

Fig. 4 (a) Total bending loss versus the curvature radius; (b) enlargement of the part in the dashed elliptic circle of (a)

3 仿真分析

用 BeamPROP 仿真软件分别对半径为 5, 10, 20 mm 的圆弧波导进行了导光仿真。一些统一参数设置同上,计算步长 $\Delta z = 100 \mu\text{m}$ 。

图 5 为光先经一段 0.15 mm 的直波导进入半径 $R = 5 \text{ mm}$, 弧心角 $\theta = 60^\circ$ 的一段弧的传输场分布情况,光场进入弯曲波导后,光场峰值向着远离圆弧中心方向发生偏移,光场因而变得不对称,传输一段距离后,光沿切向离开波导而转化成辐射模式产生辐射损耗。图中可见光在弧心角 40° 弧长 3.5 mm 处便沿切线方向辐射出去。

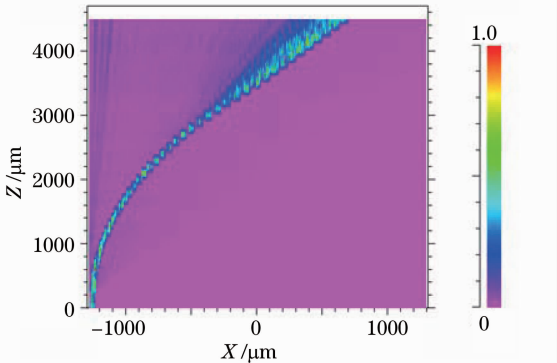


图5 半径 5 mm 的圆弧波导中光能量的传输情况

Fig. 5 Optical energy propagating in a curved waveguide at radius of 5 mm

况,所得结果如图 4 所示,波导内传输的是多模,在弯曲段逐渐损耗掉其中的高阶模,留下低阶模。每个模式的损耗显现如图 3 所示的单条曲线变化情况,由于这些曲线变化不连续,把所有模式总功率损耗叠加在一起便出现阶跃变化。弯曲损耗随半径的减少而变大,并且出现阶跃式变化,若弯曲半径大于 12 mm,弯曲损耗为零。

图 6 为先经一段 0.5 mm 的直波导进入 $R = 10 \text{ mm}$, 弧心角 $\theta = 30^\circ$ 的一段弧的传输场分布情况,大部分光能量可以在计算窗口所确定的 5.2 mm 长度的波导中稳定传播。

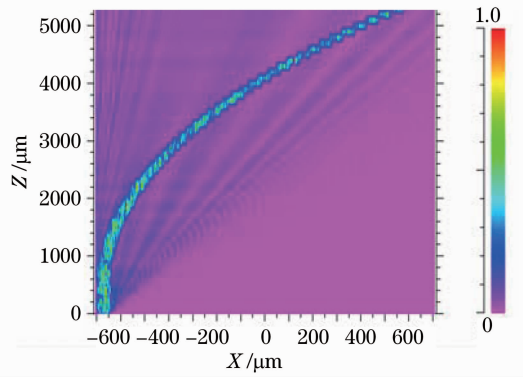


图6 半径 10 mm 的圆弧波导中光能量的传输情况

Fig. 6 Optical energy propagating in a curved waveguide at radius of 10 mm

图 7(a)为先经一段 0.5 mm 的直波导进入 $R = 20 \text{ mm}$, 弧心角 $\theta = 30^\circ$ 的一段弧的传输场分布情况,光能量在计算窗口所确定的 10.4 mm 波导长度范围内没有出现明显的辐射损耗。

图 7(b)为先经一段 0.5 mm 的直波导进入 $R = 20 \text{ mm}$, 弧心角 $\theta = 90^\circ$ 的一段弧的传输场分布情况,虽然光能量在波导内传输时无明显的辐射损耗,但

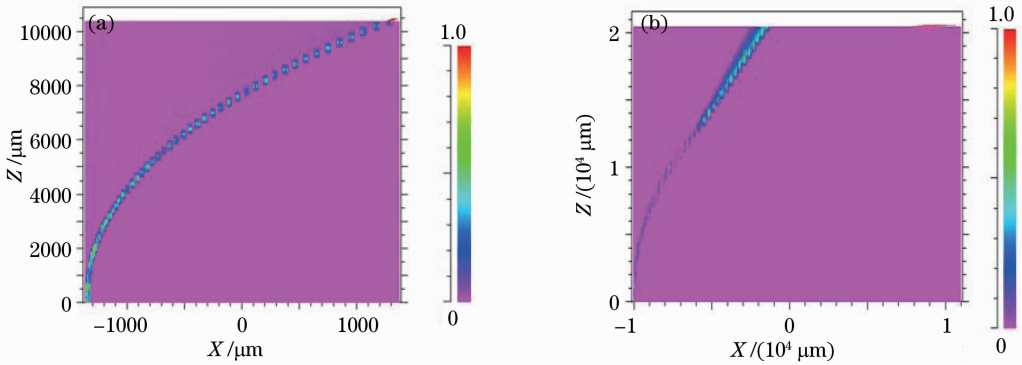


图 7 半径 20 mm 的圆弧波导中光能量的传输情况。(a) $\theta=30^\circ$; (b) $\theta=90^\circ$

Fig. 7 Optical energy propagating in a curved waveguide at radius of 20 mm. (a) $\theta=30^\circ$; (b) $\theta=90^\circ$

传输一段距离后,光沿切向离开波导而转化成辐射模式产生辐射损耗。

由仿真结果得到:随着圆弧波导曲率半径的增大,波导的弯曲辐射损耗越来越小,光能量可以稳定地在波导中传输一定的距离,但不能完成 90° 转向。

4 弯曲损耗测量

实验采用数字化散射法^[17],用数字成像器件 CCD 对弯曲的波导上对应点的散射光强进行记录,使用此方法可以不变动耦合输入端,不破坏波导,实现多次测量。测量原理如图 8 所示,利用 633 nm 的氦氖激光器作为光源,通过透镜将光耦合进光纤,在显微镜的监视下通过精密微动调节台将光纤输出的光直接耦合进聚合物光波导,波导放置在半径为 R 的圆柱形支架上,在波导上方利用带有显微镜镜头的 SunStar300(波长范围 400~1060 nm) 超高灵敏度 CCD 摄像机对准弯曲波导的法线方向,记录其散射光强,然后转换为光强分布图。波导弯曲前和波

导弯曲后两种情况的光强分布如图 9 所示,波导弯曲后损耗明显。由多次测量的光强分布图得到弯曲损耗随曲率半径变化的实验结果如图 10 所示。

测量结果显示曲率半径在 5~6 mm 之间时弯曲损耗值在 0.55~0.8 dB/cm 之间,考虑直波导固有的传输损耗 0.13 dB/cm,对比图 4(b) 的理论结果,再考虑到测量中因每次调节半径引入的误差,可看出实验值变化曲线与理论值基本相符。

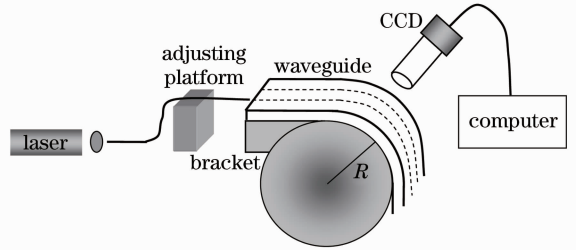


图 8 波导弯曲损耗测量原理图

Fig. 8 Schematic diagram of the waveguide bending loss measurement

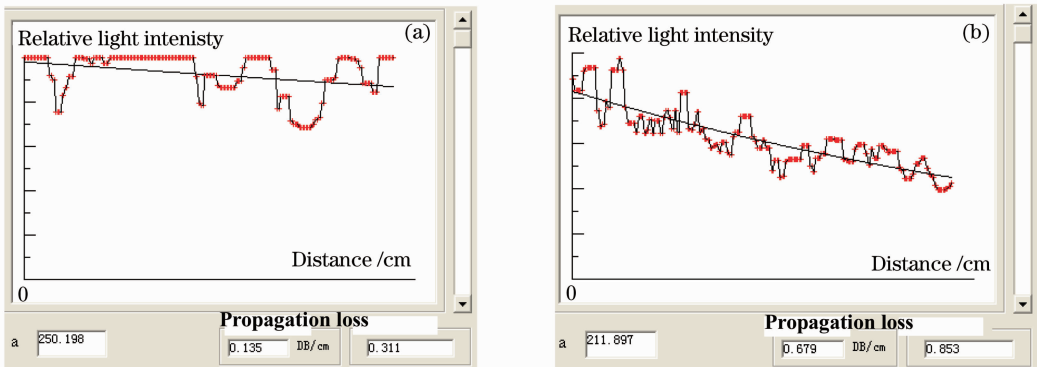


图 9 散射光强度分布图。(a)波导弯曲前;(b)波导弯曲后

Fig. 9 Optical intensity distribution of scattered light. (a) Before bending; (b) after bending

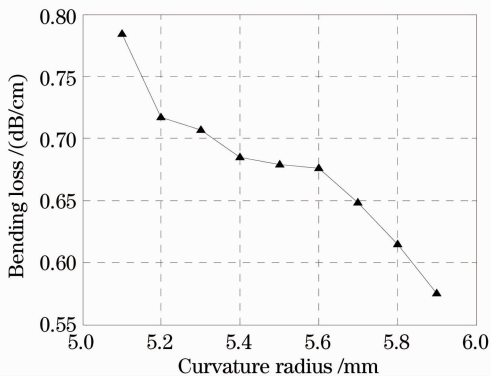


图10 弯曲损耗随曲率半径变化的实验结果

Fig. 10 Experiment result of bending loss versus the effective curvature radius

4 结 论

研究了聚硅氧烷光波导弯曲时弯曲损耗与曲率半径的关系,理论分析表明弯曲损耗随模阶数的增加而变大,随半径的减少而变大,总弯曲损耗出现阶跃式变化。仿真分析表明随着波导曲率半径增大,波导的弯曲辐射损耗减小,当弯曲半径在5~20 mm之间时,光进入波导后能传输一定的距离后便沿切线方向辐射出去,不能实现90°转向。实验结果显示曲率半径在5~6 mm时弯曲损耗值在0.55~0.8 dB/cm之间,考虑到所制备的聚硅氧烷直波导固有的传输损耗,实验值与理论值基本相符。研究表明对于大截面的聚硅氧烷光波导,当曲率半径大于4 mm时,波导的弯曲损耗小于1 dB/cm,因此,如果对波导的参数和弯曲形状进行优化设计,该研究结果对于实现与弯曲相关的聚合物波导器件有较大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 A. Neyer, S. Kopetz, E. Rabe *et al.*. Electrical-optical circuit board using polysiloxane optical waveguide layer[C]. *Orland: Electronic Components and Technology Conference*, 2005, **35**(3): 246~250
- 3 Sung Hwan Cho. Optofluidic waveguides in teflon AF-coated PDMS microfluidic channels[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1057~1059

- 4 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
- 5 Yunji Yi, Changming Chen, Pengcheng Zhao *et al.*. Polymer waveguide delay device using right-angle X junctions [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2011, **53**(7): 1666~1669
- 6 Lu Rongguo, Liao Jinkun, Li Heping *et al.*. Optimized design for polymeric S-shape ridge waveguide[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(6): 447~452
陆荣国, 廖进昆, 李和平等. 聚合物S形脊波导的优化设计[J]. *科学通报*, 2010, **55**(6): 447~452
- 7 Liu Yanting, Ni Wei, Wu Xingkun. A soft-lithography-based vertically coupling structure for multilayered optical interconnection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 813~818
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): 813~818
- 8 Lu Rongguo, Liu Yongzhi, Liao Jinkun *et al.*. Bending loss study of polymeric S-shape rib waveguide [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(5): 638~750
陆荣国, 刘永智, 廖进昆等. 有机聚合物S形脊波导的弯曲损耗研究[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(5): 638~750
- 9 Jenn-Jia Su, Way-Seen Wang. Novel coherently coupled multisectional bending optical waveguide[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1112~1114
- 10 Michael Krause. Finite-difference mode solver for curved waveguides with angled and curved dielectric interfaces [J]. *J. Lightwave Technology*, 2011, **29**(5): 691~699
- 11 Alireza Kargar. Bending efficiency analysis of horizontal single- and multiple-slot waveguide microrings [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2011, **7**(1): 5~9
- 12 Ioannis Papakonstantinou, Kai Wang, David R. Selvich *et al.*. Transition, radiation and propagation in polymer multimode waveguide bends [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 669~679
- 13 Feng Xianghua, Wen 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
- 14 Feng Xianghua, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. Fabrication of polysiloxane optical ridge waveguides for optical interconnection [C] *SPIE*, 2010, **7847**: 784723
- 15 Cao Zhuangqi. *Waveguide Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2007. 83~87
曹庄琪. *导波光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 83~87
- 16 F. J. Mustieles, E. Ballesteros, P. Baquero. Theoretical S-bend profile for optimization of optical waveguide radiation losses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(5): 551~553
- 17 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