

# 650 nm 阵列波导光栅波分复用器的设计与制备

韩 超 岳远斌 赵世民 陈长鸣\* 张大明

(吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林 长春 130012)

**摘要** 由于光通信网络的“最后一公里”问题有望通过 650 nm 的聚合物光纤系统得到解决, 制备了与之匹配的  $16 \times 16$  信道聚合物阵列波导光栅波分复用器。器件设计采用了矩形波导结构, 针对 650 nm 波长的光, 选用的芯层与包层折射率分别为 1.4888 和 1.482, 通过软件进行光传播模拟, 信道插入损耗为 2.3~5.1 dB, 串扰水平为 -24 dB, 模拟信道的间隔为 1.6 nm。器件的制备选用了实验室自主合成的折射率不同的聚甲基丙烯酸甲酯材料作为芯层与包层, 利用光刻和感应耦合等离子体刻蚀工艺得到了较为完好的器件形貌, 最终制备出的样品面积为  $4 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。通过聚合物光纤(POF)将 650 nm 波长的光耦合进入器件进行测试并获得了良好的波分复用效果。红光波段的阵列波导光栅波分复用器在未来的光通信及传感领域中将起到重要作用。

**关键词** 光学器件; 聚甲基丙烯酸甲酯; 阵列波导光栅; 650 nm

**中图分类号** TN405.98<sup>+</sup>2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0323002

## Design and Fabrication of 650 nm Arrayed Waveguide Grating

Han Chao Yue Yuanbin Zhao Shimin Chen Changming Zhang Daming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Experimental Plot,  
College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract** Because “the last kilometer” problem of the optical communication network is expected to be solved by the 650 nm polymer optical fiber system, a  $16 \times 16$  channel polymer array waveguide grating (AWG) wavelength division multiplexer is successfully fabricated to match the system. The design of the device is chosen as rectangular waveguide structure, while the refractive indices of the core layer and cladding layer are selected as 1.4888 and 1.482, respectively. By OptiBPM software, it is obtained that the channel insert loss is from 2.3 dB to 5.1 dB, the crosstalk level is -24 dB, and the channel spacing is 1.6 nm. For the fabrication of device, the polymethyl methacrylate (PMMA) material is choosed which is synthesized in our laboratory. By the ultraviolet (UV) lithography and inductively coupled plasma (ICP) etching process, a fine waveguide morphology is obtained, and finally the sample's area is  $4 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ . The polymer optical fiber (POF) is used to couple the 650 nm visible light into AWG device for testing and excellent multiplexing/de-multiplexing performances are achieved. The AWG wavelength division multiplexer in red-light wave band will play an important role in the future optical communication.

**Key words** optical devices; polymethyl methacrylate; arrayed waveguide grating; 650 nm

**OCIS codes** 230.1950; 230.7380; 250.5460; 220.4000

**收稿日期**: 2012-09-20; **收到修改稿日期**: 2012-10-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(61107019, 61077041, 61107027)、教育部高等学校博士点专项科研基金(20110061120054)、中国博士后科学基金面上项目(2011M500597)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50277)、吉林省科技发展计划项目(20110315)、吉林省青年科学基金(20100174)和吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(201103071, 201100253)资助课题。

**作者简介**: 韩 超(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事聚合物阵列波导光栅器件方面的研究。

E-mail: stefseek@yahoo.com.cn

**导师简介**: 张大明(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光电子器件、有机光子器件及其集成技术等方面的研究。E-mail: zhangdm@jlu.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: chencm@jlu.edu.cn

# 1 引言

随着当今信息时代科技的高速发展,人们对于信息的需求日益增大,大容量高带宽的信息传输成为需求重点<sup>[1~3]</sup>。在推进三网融合和光纤入户的进程中,“最后一公里”成为急需解决的问题,而 650 nm 的光纤传输系统有望成为解决方案之一。由于塑料光纤有制造简单、价格便宜、接续快捷等优点,已成为短距离宽带通信网的理想选择之一<sup>[4]</sup>,因而研制与之配套的聚合物阵列波导光栅(AWG)具有重要的意义。AWG 作为波分复用系统中的重要组成部分,在无机材料方面有着多样化的研究成果<sup>[5~7]</sup>。聚合物 AWG 相对于传统的无机 AWG 具有价格低廉、制作工艺简单等优势,可实现多通道数、窄带宽间隔的波分复用功能<sup>[8]</sup>,目前 650 nm 波段的聚合物 AWG 已成为国内外的研究热点,国外已有关于红光波段 4 信道 AWG 的相关报道<sup>[9]</sup>。

本文选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料体系,对 650 nm 波段的 AWG 器件进行了设计、制备与测试,获得了初步的良好通光结果。

# 2 器件的设计

设计所采用的材料是实验室自主合成的、对 650 nm 波段光吸收小以及成膜性好的甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸环氧丙酯共聚物 [P(MMA-GMA)] 材料<sup>[10]</sup>,通过双酚 A 型(BPA)环氧树脂作为高折射率调节剂(AIBN)来配制不同折射率的 PMMA 作为芯层和包层材料。在原有材料配制方法的基础上针对 650 nm 波段芯层与包层折射率的匹配性进行了改进,利用椭圆仪测得在 650 nm 波长处,芯层材料折射率为  $n_{core} = 1.4888$ ,包层材料折射率为  $n_{cladding} = 1.482$ 。材料配制的反应方程式及双酚 A 的分子式如图 1 所示。

器件采用矩形波导结构,在硅衬底上采用 3 层 PMMA 材料形成波导,具体结构如图 2 所示。

在确定材料体系的基础上,采用马卡梯里近似法确定了可实现单模传输的波导最大尺寸,如图 3 所示,其中  $n_s$  为平板波导的有效折射率,  $n_c$  为传输波导的有效折射率。考虑到矩形波导厚度与宽度比对偏振相关性的影响,取二者相等来消除在不同模式下的波长漂移。综上考虑之后,选取波导尺寸为  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。通过测试得到此尺寸下器件输入信道与光纤之间的耦合损耗在 3 dB 左右。

AWG 其他功能参数的设计步骤如下<sup>[11]</sup>:

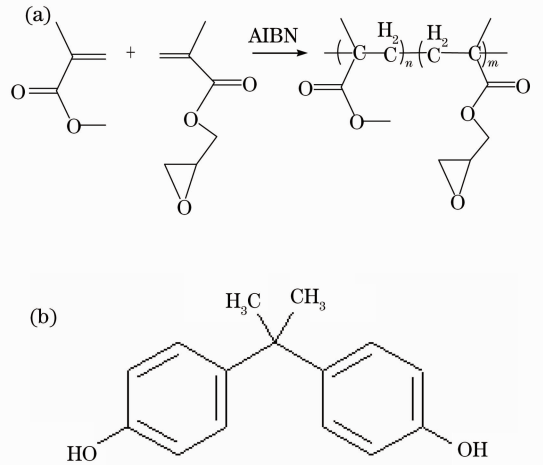


图 1 (a) P(MMA-GMA) 合成方程式; (b) 双酚 A 分子式  
Fig. 1 (a) Synthesizing formula of P(MMA-GMA); (b) molecular formula of BPA

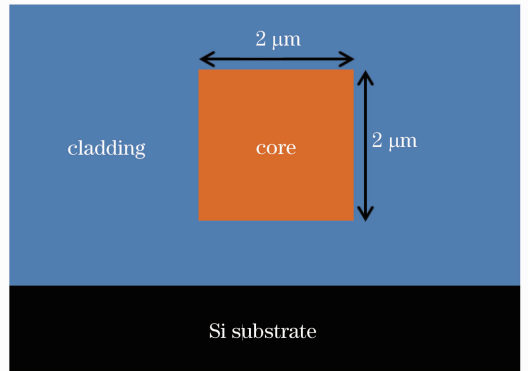


图 2 矩形波导结构示意图  
Fig. 2 Structure of rectangular waveguide

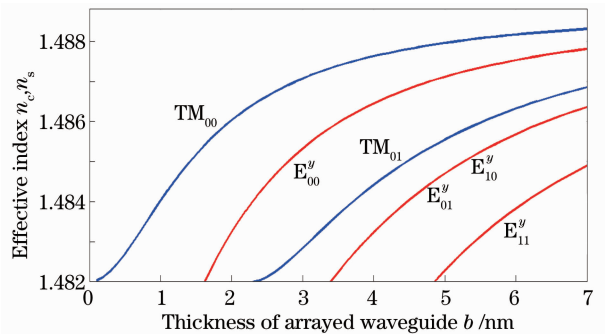


图 3 矩形与平板波导有效折射率  
Fig. 3 Effective indices of slab and rectangular waveguides

- 1) 输入信道数与输出信道数均选为 16;
- 2) 波长间隔选取为 1.6 nm;
- 3) 自由光谱区(FSR)通过公式  $R_{FSR} = N\Delta\lambda$  计算得到,其中  $N$  为输入输出(I/O)通道波导数,同时考虑到波长漂移以及制作工艺误差等因素,最后确定为 15.21 nm;

4) 衍射级数  $m = f_{\text{integer}}(\lambda_0/R_{\text{FSR}})$  计算, 其中函数  $f_{\text{integer}}(\cdot)$  表示取整数,  $\lambda_0$  为中心波长;

5) 相邻阵列波导间长度差  $\Delta L$  通过  $\Delta L = (\lambda_0 m/n_c)$  计算得到;

6) 相邻波导间距  $d$  的选取要充分考虑到器件尺寸以及对于串扰的影响, 波导间距  $d$  太大会使器件的尺寸增大, 太小会使串扰增大。综合考虑选取  $d=6 \mu\text{m}$ 。

使用 Matlab 软件对以上 AWG 各参数进行了详细的模拟, 最后确定的参数如表 1 所示。通过 OptiBPM 软件进行光传播模拟, 信道插入损耗为 2.3~5.1 dB, 串扰水平为 -24 dB, 模拟信道的间隔为 1.6 nm。模拟得到的传输光谱如图 4 所示。

表 1 器件各主要参数

Table 1 Main parameters of the device

Parameter	Value
Central wavelength $\lambda_0/\mu\text{m}$	0.65
Channel spacing $\Delta\lambda/\text{nm}$	1.6
Width of arrayed waveguide $a/\mu\text{m}$	2
Thickness of arrayed waveguide $b/\mu\text{m}$	2
Index of core layer $n_1$	1.4888
Index of cladding layer $n_2$	1.482
Effective index of slab waveguide $n_s$	1.4832366
Effective index of channel waveguide $n_c$	1.4860282
Diffraction order $n$	25
I/O and arrayed waveguide pitch $d/\mu\text{m}$	6
Focal length $f/\mu\text{m}$	2312.94
Free spectral range /nm	16.187
Number of arrayed waveguides $M$	71
Number of I/O waveguides $N$	16

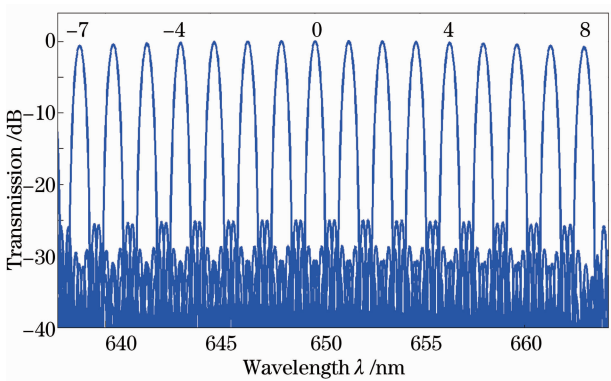


图 4 理论模拟的传输光谱

Fig. 4 Simulated transmission spectra

### 3 器件的制备

AWG 器件的制备采用了实验室自主研究的 PMMA 工艺: 采用硅片作为衬底, 然后在衬底上旋

涂一层 PMMA 包层材料作为下包层, 并在 120 °C 下固化 120 min; 然后旋涂 PMMA 芯层材料并在 120 °C 下固化 120 min; 用真空蒸镀的方法在芯层表面蒸镀一层 60~90 nm 厚的铝膜, 并在铝膜上面旋涂一层 BP212 正性光刻胶, 在 85 °C 下固化 20 min 后进行对版光刻; 用湿法腐蚀的方法通过显影在铝膜上得到 AWG 器件图形, 然后采用感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀方法<sup>[12]</sup>代替传统的反应离子刻蚀 (RIE) 方法刻蚀芯层材料得到波导图形; 去除铝膜, 旋涂 PMMA 包层材料作为上包层并在 120 °C 下固化 120 min, 得到完整的器件。流程示意图如图 5 所示。

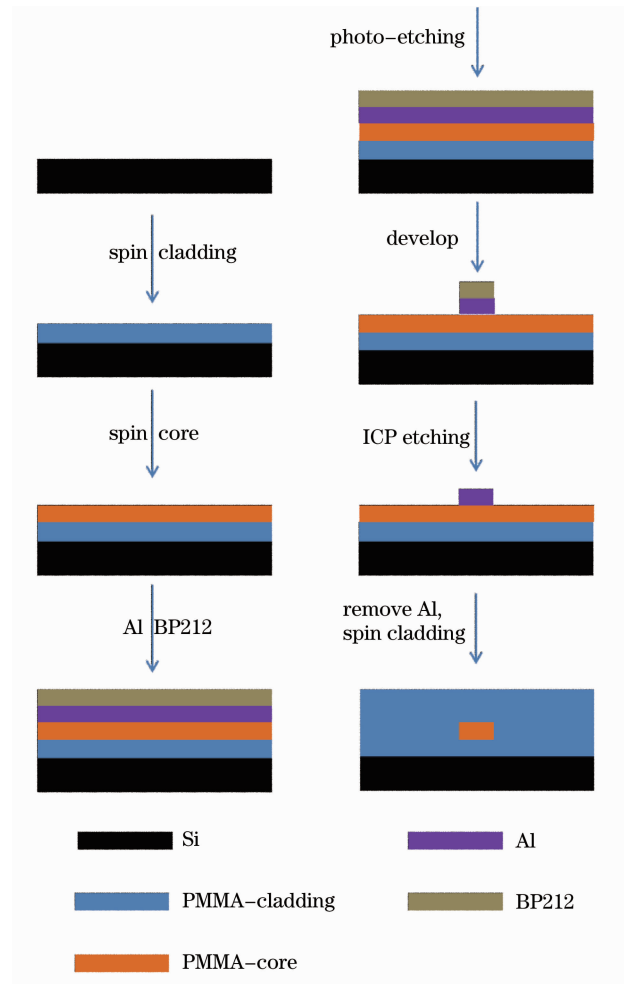


图 5 器件制备工艺流程

Fig. 5 Fabrication process of the device

图 6 是波导在经过 ICP 刻蚀之后得到的表面扫描电子显微镜 (SEM) 图像, 可以看出波导的刻蚀形貌与侧壁陡直度均良好, 而且基本无侧蚀现象。

### 4 器件的测试

制备得到的器件在以 650 nm 波长激光器为光源的测试系统下进行了测试。图 7 为测试系统的示

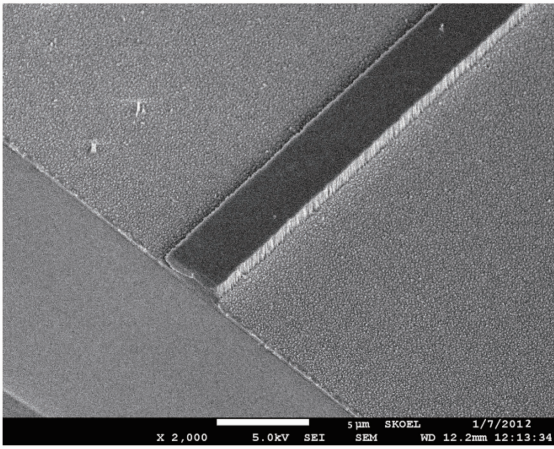


图 6 ICP 刻蚀得到的波导 SEM 图像

Fig. 6 SEM image of waveguide after ICP etching

意图。

由于聚合物光波导器件与聚合物光纤 (POF) 系统有很好的匹配性<sup>[13]</sup>, 将 650 nm 红光激光器的输出光通过聚合物光纤耦合进入 AWG 器件, 在激光器输入电流为 7.9 mA 时获得如图 8 所示的近场输出光斑。从图中可以看出 16 个信道均可以传输光信号。与输出光信号对应的强度光谱曲线如图 9 所示。

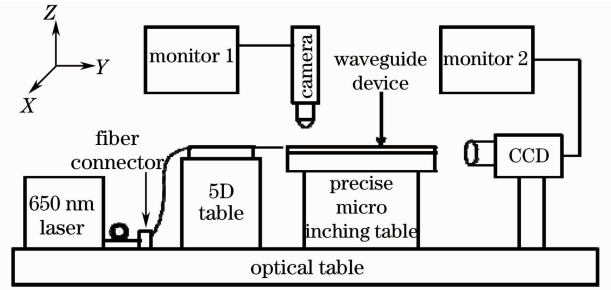


图 7 器件的测试系统

Fig. 7 Test system for the device

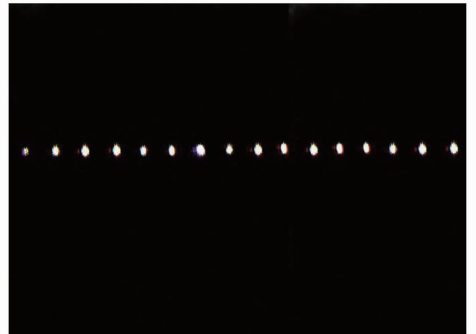


图 8 近场输出光斑

Fig. 8 Output light spot of the near field

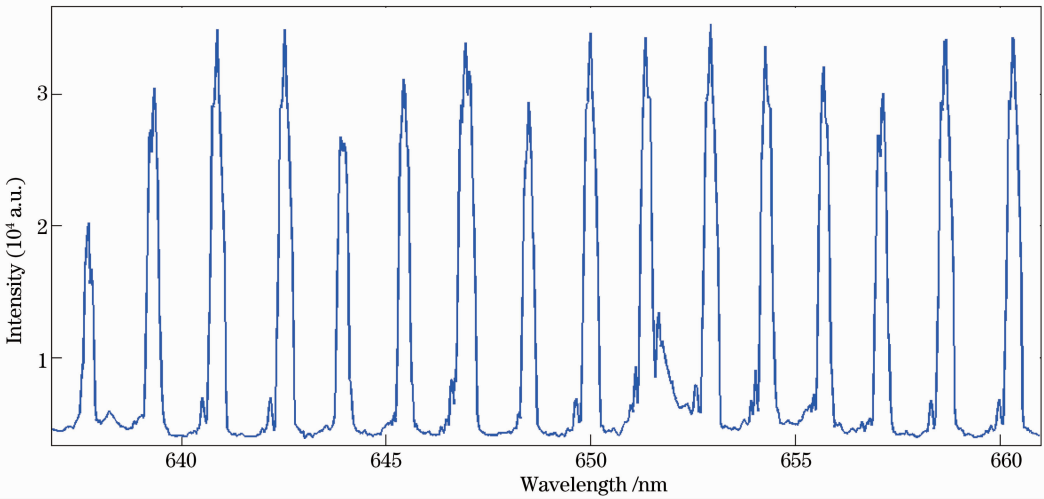


图 9 AWG 输出光信号的强度曲线

Fig. 9 Intensity curve of AWG output signal

## 5 结 论

选用自主合成的 PMMA 聚合物作为包层与芯层材料, 在理论设计的基础上制备了 650 nm 波段的 AWG 波分复用器件, 并且在红光段的测试中得到了良好的近场输出光斑。利用 OptiBPM 软件对器件的各项性能进行了模拟, 得到了信道插入损耗为 2.3~5.1 dB, 串扰水平为 -24 dB, 测试得到的

波长间隔与理论设计的 1.6 nm 接近。通过进一步改进材料体系和制备工艺以及测试条件, 有望使器件的性能得到更大的提高。

随着光通信网络对于信息带宽与容量的要求日益提高, “最后一公里”的问题也越来越亟待解决, 而 650 nm 聚合物光纤系统的发展为问题的解决提供了一个可行的办法, 研制 650 nm 红光波段 AWG 波

分复用器与之进行匹配有重要的意义。尽管现在的设计与制备工艺都不够完善,但 650 nm AWG 波分复用器有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 F. Wang, K. Chen, W. Sun *et al.*. 32-channel arrayed waveguide grating multiplexer using low loss fluorinated polymer operating around 1550 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 665~669
- 2 Jeong Hwan Song, Oh Dal Kwon, Dong-Su Kim *et al.*. Characterization of birefringence and dispersion properties in an arrayed waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(S1): 293~294
- 3 Lang Tingting, Lin Xufeng, He Jianjun. Fabrication of silica-on-silicon arrayed waveguide gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0213303  
郎婷婷, 林旭峰, 何建军. 硅基二氧化硅阵列波导光栅制作工艺的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0213303
- 4 Cheng Cheng, Wang Sunde, Ma Dewei. Preparation and spectra of CdSe-quantum-dot-doped PMMA fiber materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0316002  
程成, 王孙德, 马德伟. PMMA 基底 CdSe 量子点光纤材料的制备及其光谱[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0316002
- 5 Wang Youbin, Huang Xuguang. Analysis and optimization of a novel arrayed-waveguide grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 454~459  
王有斌, 黄旭光. 新型阵列波导光栅的分析与优化[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 454~459
- 6 Y. Wang, X. Huang. High-resolution liquid refractive index sensor using reflective arrayed-waveguide grating[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2010, **42**(8): 1312~1317
- 7 A. S. Vananim, R. Ghayour. New structural design of passive optical array waveguide grating-wavelength division multiplexing to upgrade the multiplexing/demultiplexing characteristic [J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(10): 105004
- 8 F. Wang, A. Z. Li, W. Sun *et al.*. Polymeric 1×32 arrayed waveguide grating multiplexer using cross-linkable fluorinated poly (ether ether ketone) at 1550 nm [J]. *Opt. Mater.*, 2006, **28**(5): 494~497
- 9 J. S. Kee, D. P. Poenar, P. Neuzil *et al.*. Design and fabrication of poly(dimethylsiloxane) arrayed waveguide grating [J]. *Opt. Express*, 2010, **21**(18): 21732~21742
- 10 Chen Changming. The Basic Research on Polymer/Si Planar Optical Waveguide Devices[D]. Changchun: Jilin University, 2010. 57~58  
陈长鸣. 硅基聚合物平面光波导器件的基础研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010. 57~58
- 11 Tan Zhenyu, Zhang Feng, Chen Changming *et al.*. Design of wavelength division multiplexer of polymer arrayed waveguide grating at 650 nm [J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(1): 71~75  
谭震宇, 张峰, 陈长鸣等. 650 nm 聚合物阵列波导光栅波分复用器设计[J]. *中国光学*, 2012, **5**(1): 71~75
- 12 Zhang Kun, Yue Yuanbin, Li Tong *et al.*. Application of ICP etching in fabrication of polymer optical waveguide [J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(1): 64~70  
张琨, 岳远斌, 李彤等. 感应耦合等离子体刻蚀在聚合物光波导制作中的应用[J]. *中国光学*, 2012, **5**(1): 64~70
- 13 M. Yonemura, A. Kawasaki, S. Kato *et al.*. Polymer waveguide module for visible wavelength division multiplexing plastic optical fiber communication [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2206~2208

栏目编辑: 王晓琰