

文章编号: 0253-2239(2004)09-1259-6

偏心激励聚合物光纤横截面的光功率分布*

杨 春 毕晓峰 管志强

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘要: 研究了偏心激励多模聚合物光纤横截面的光功率分布。用光线追迹法计算了不同的激励源偏心距离和光纤长度时, 光纤出射端横截面的光功率分布, 并用二维 CMOS 图像探测器阵列进行了测量。数值计算和实验测量的结果均表明随着激励源偏心距的增加, 光功率分布由光纤轴心向外偏移并形成环状; 光功率分布在圆周方向的均匀性随着光纤长度的增加而趋于均匀。对中心激励的弯曲光纤光功率分布的测量结果表明, 当弯曲曲率半径远大于临界曲率半径时, 光功率分布无显著展宽, 光功率分布随曲率半径的减小而向曲率外侧偏移; 当光纤弯曲半径接近于临界曲率半径时, 光功率分布显著展宽。

关键词: 光纤通信技术; 聚合物光纤; 偏心激励; 光功率分布; 弯曲

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Optical Power Distribution in Multimode Polymer Optical Fiber under Offset Launching

Yang Chun Bi Xiaofeng Guan Zhiqiang

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

(Received 9 July 2003; revised 4 December 2003)

Abstract: Numerical and experimental studies of cross sectional optical power distribution (OPD) in polymer optical fiber under offset launch are given. The OPD of fibers with various lengths and under various launch offsets are numerically simulated by using ray tracing method and measured by two-dimensional CMOS image detector array. Results show that the OPD shifts gradually away from axis center and forms ring with increasing of launch offset and the circular uniformity increases with the length of fiber. OPD measurements are taken on bend fibers under center launch. It is indicated that the OPD shift gradually away from axis to outer radii with the decrease of curvature radii when curvature radii are far greater than critical radius of curvature. When curvature radii decrease to critical radius, the OPD is significantly broaden under mode coupling effect.

Key words: optical fiber communication technology; polymer optical fiber; offset launch; optical power distribution; bending

1 引 言

聚合物光纤的芯径和数值孔径很大, 便于连接, 作为短距离网络的一种潜在的优良传输介质正受到广泛的关注和研究^[1~5]。由于聚合物光纤局域网中

需要使用大量的光纤互连器件, 因此国外在研制高性能聚合物光纤方面取得很大进展的同时, 正在积极开展聚合物光纤耦合器的研究^[2~7]。其中, 混合棒光纤耦合器是一种特别适合于聚合物光纤的高性价比的耦合器结构^[2~4]。由于混合棒中的光功率分布决定了耦合器的分光均匀性, 因此掌握大直径多模光纤在偏心激励以及弯曲状态下的光功率分布是很重要的。

多模光纤的偏心激励是一项提高多模光纤传输

* 国家自然科学基金(60007005)、江苏省创新人才项目(BK2003406)资助课题。

E-mail: yangchun@seu.edu.cn

收稿日期: 2003-07-09; 收到修改稿日期: 2003-12-04

带宽的技术^[8],研究光纤中的光功率分布对于掌握光纤中的模式分布规律和带宽提高的机制是很重要的。另外,多模光纤光放大器在自由空间光通信中具有很好的应用前景^[9],信号光和抽运光从多模掺铒光纤的端面注入处于偏心激励状态,信号光和抽运光场分布的重叠程度是影响放大器性能的关键因素。

对于直径较大的光纤,用电磁场理论进行解析分析非常困难^[10,11]。光线追迹法仍然是大直径多模光纤理论分析和数值仿真的主要方法^[10,12]。

本文分别从数值计算和实验测量两个方面,研究偏心激励的阶跃折射率多模光纤在不同的偏心距和不同的光纤长度情况下出射端的光功率分布。对中心激励的多模光纤在弯曲情况下的出射端光功率分布进行了测量。

2 实 验

图 1 为聚合物光纤偏心激励的实验系统。光源采用恒流源激励的红光激光二极管(LD),波长为

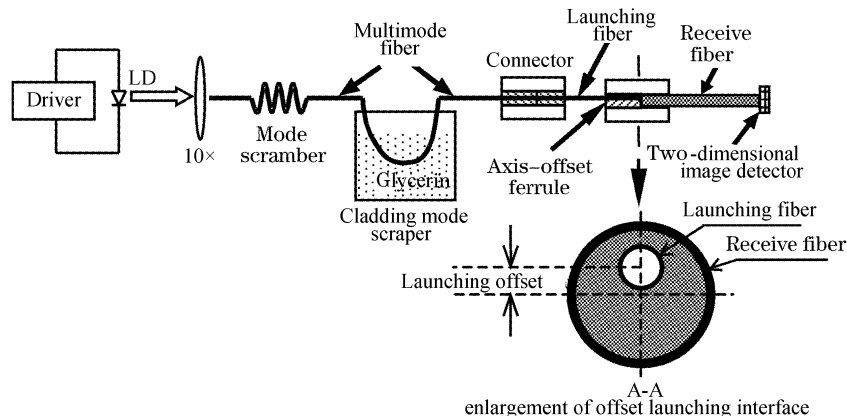


Fig. 1 Schematic diagram of the offset-launching experimental setup

3 数值仿真

采用光线追迹法进行受激光纤偏心激励的数值仿真,计算未考虑模式耦合。假设激励光纤的出射端光功率呈均匀分布,并且模式功率等量分布,该假设对应于实验系统激励光纤 A-A 剖面的光场。根据上述假设,将激励光纤的出射端面分成大小相等的数个二维网格,每个网格向束缚光线临界角对应的空间立体角内出射数个光线,每根光线对应的空间立体角相等。计算每根光线在受激光纤中的轨迹,并统计受激光纤出射端面各个位置的光线数,受激光纤出射端的光功率分布即为单位面积上的光线数。

650 nm。激光二极管的出射光经一个 10 倍显微物镜聚焦后,注入直径 1 mm、芯径 0.98 mm、数值孔径 0.5 的聚甲基丙烯酸甲酯光纤(Asahi Chemical TB1000)。然后,经扰模并剥除包层模后得到模式均匀激励的稳态光功率分布。此稳态光场经光纤连接器注入结构相同的激励光纤,从而在激励光纤的 A-A 剖面得到模式功率均匀分布的稳态光场。激励光纤的出射端通过偏心套管与受激光纤连接,对受激光纤形成偏心激励。激励源偏心距由偏心套管控制,偏心距精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。受激光纤采用直径 3 mm、芯径 2.98 mm、数值孔径 0.5 的 PMMA 光纤(Asahi Chemical DB3000)。受激光纤的出射端面与二维 CMOS 光探测器阵列直接对接,用来测量出射端的光功率分布。

实验制作了多种偏心距的偏心套管以及不同长度的受激光纤样品,受激光纤的弯曲通过将光纤固定在具有特定曲率半径的模板上实现。对不同的激励源偏心距和不同的受激光纤长度,以及中心激励且受激光纤弯曲情形的出射端光功率分布进行了测量。

对不同的激励源偏心距和不同的受激光纤长度的出射端光功率分布进行了计算,计算所用光线的条数为 600 多万条。

4 实验和数值仿真结果

4.1 光功率分布与激励源偏心距、受激光纤长度的关系

我们分别对受激光纤长度 L 为 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm,在激励源偏心距 S 分别为 0、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 情况下的出射端光功率分布进行了计算和测量。以下分别针对不同混合棒长度的情形进行数据的对比分析。

图 2 是 $L=5\text{ cm}$ 时, 出射端光功率分布的数值计算和实验结果对比。图 2(a)~图 2(d) 分别是 S 为 0、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 的数值计算结果, 图 2(e)~图 2(h) 分别是 S 为 0、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 的实验测量结果。图形的纵坐标表示光功率的相对大小。计算和实验测量结果均表明, 中心激励时, 光功率的峰值在光纤的轴心处; 偏心激励时, 光功率的峰值偏离光纤轴心, 并且随着 S 的增

加, 光功率的峰值由光纤轴心向外偏移。当偏心距大于 0.6 mm 时, 光纤轴心处出现明显的光功率较弱的低谷区域, 远离轴心区域出现光强较大的圆环区域。图 3、图 4、图 5 分别是 L 为 10 cm、15 cm、20 cm 时的数值计算和实验测量结果。同样可以看到, 中心激励时, 光功率的峰值在光纤的轴心处; 偏心激励时, 光功率的峰值偏离光纤轴心, 并且随着 S 的增加, 光功率的峰值由光纤轴心向外偏移。

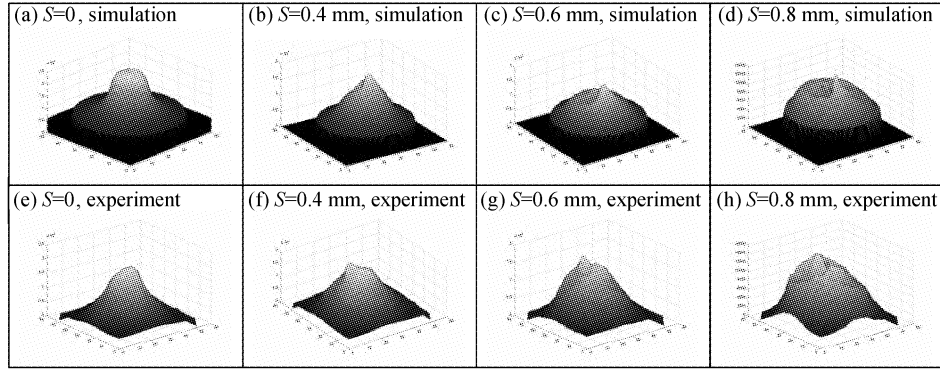


Fig. 2 Cross sectional optical power distribution of the launched fiber with length of 5 cm

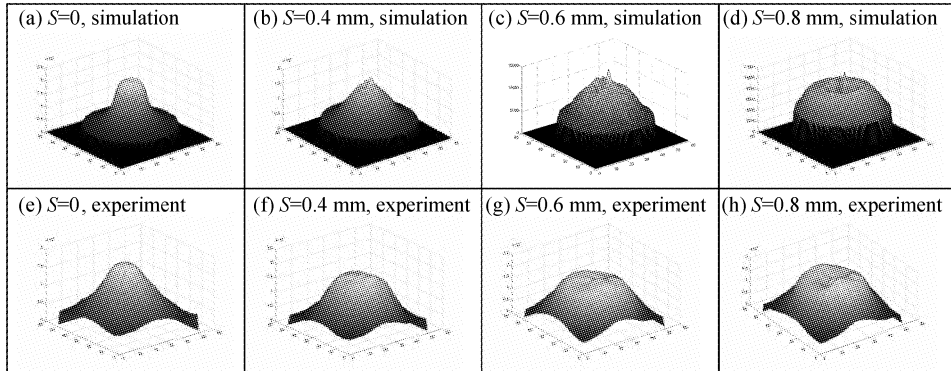


Fig. 3 Cross sectional optical power distribution of the launched fiber with length of 10 cm

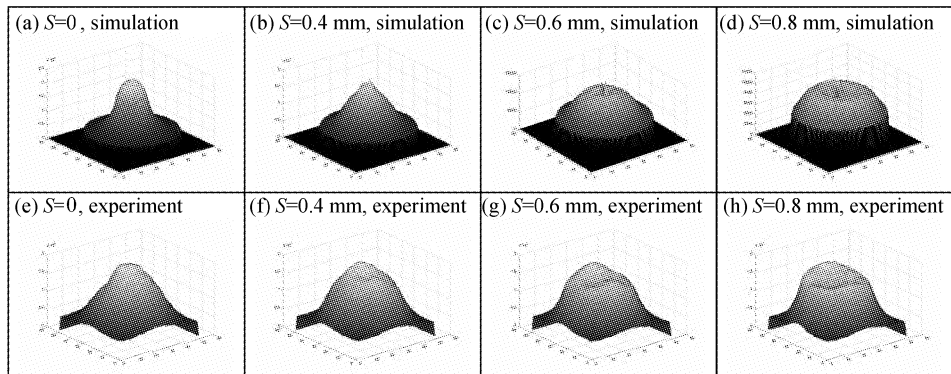


Fig. 4 Cross sectional optical power distribution of the launched fiber with length of 15 cm

从电磁场模式理论的角度分析, 入射场与受激光纤第 m 阶导波模之间的功率耦合系数 η 可用入射场分布函数 $A(\phi, r)$ 和导波模场分布函数 $B_m(\phi, r)$ 的重叠积分表示如下^[13]

$$\eta = \left(\iint AB_m^* d\phi dr \right)^2 / \left(\iint AA^* d\phi dr \right) \left(\iint B_m B_m^* d\phi dr \right), \quad (1)$$

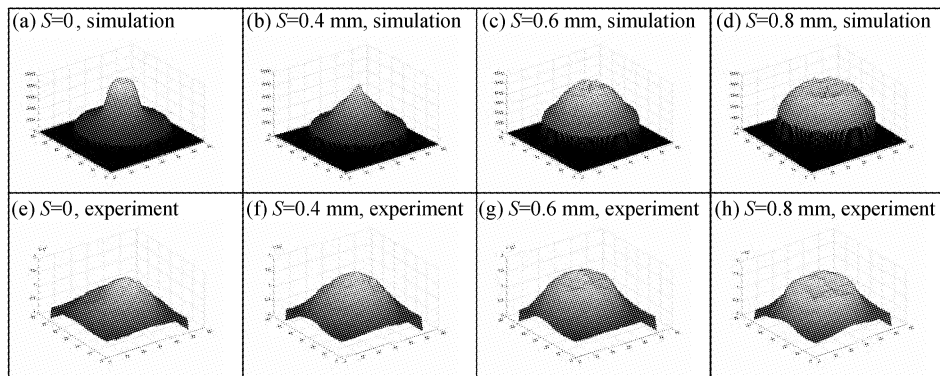


Fig. 5 Cross sectional optical power distribution of the launched fiber with length of 20 cm

在光纤横截面的单位面积上,低阶模的场分布在光纤的轴心区域相对较强,而高阶模的场分布在远离轴心区域相对较强。因此,在中心激励情况下,低阶模得到了较强的激励,高阶模的激励程度较弱;在偏心激励情况下,低阶模的激励较弱,高阶模得到了较强的激励,并且 S 越大,高阶模占总功率的比例也越大。

4.2 光功率分布沿圆周方向的均匀性与受激光纤长度的关系

4.2.1 离轴区域的光功率分布与受激光纤长度的关系

对比图 2~图 5 中相同偏心距、不同受激光纤长度的光功率分布。可见在 $L=5$ cm、 $S \geq 0.6$ mm 时,光功率分布呈不均匀的环形,环上有显著的光功率较大的峰。当 $L \geq 10$ cm、 $S \geq 0.6$ mm 时,光功率

分布为沿圆周方向基本均匀的环形,环上没有显著的光功率较大的峰。而且,在激励源偏心距相同的情况下,光功率分布在圆周方向的均匀性随着受激光纤长度 L 的增加而趋于均匀。

4.2.2 近轴区域光功率分布与受激光纤长度的关系

图 6 是激励源偏心距为 0.8 mm、受激光纤长度分别为 6(a) 5 cm、图 6(b) 10 cm、图 6(c) 50 cm 时光功率分布的数值仿真结果,受激光纤长度分别为图 6(d) 5 cm、图 6(e) 10 cm、图 6(f) 15 cm 时光功率分布的实验测量结果。由图 6(a) 可见,当 $L=5$ cm 时,近轴区域在水平方向有两处光强较弱的低谷,对应于图 6(d) 中的暗斑;在垂直方向有光强较大的高峰,对应于图 6(d) 中的亮斑。由图 6(b) 可见,在 $L=10$ cm 时,近轴区域水平方向的低谷和垂直方向的高峰更接近于轴心,离轴区域光强分布

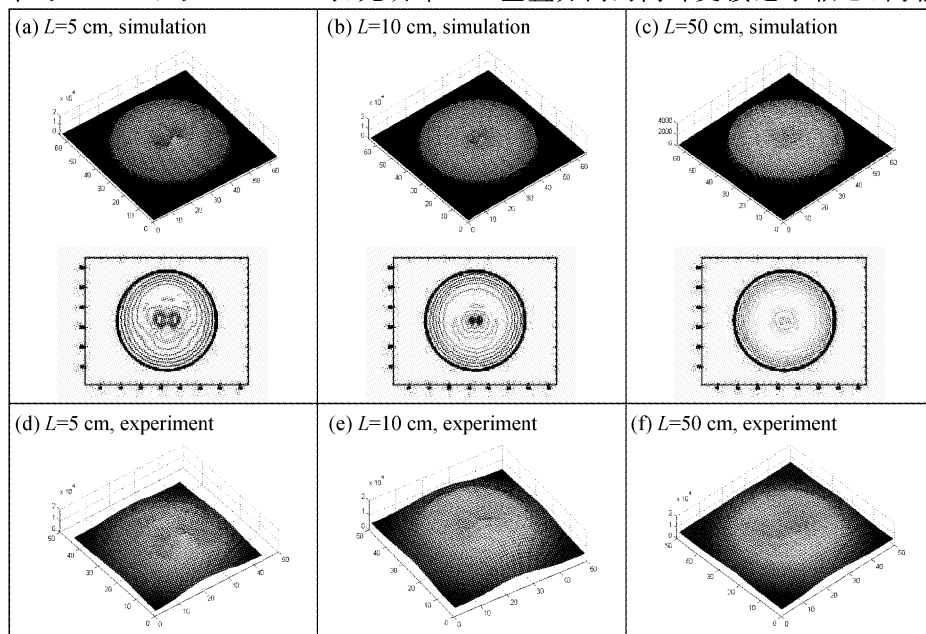


Fig. 6 $S=0.8$ mm, three-dimensional amplitude and two-dimensional contour graphs of the output intensity distribution for the offset-launched fibers of different lengths. Numerical simulation results for $L=$ (a) 5 cm, (b) 10 cm and (c) 50 cm. Experimental results for $L=$ (d) 5 cm, (e) 10 cm, (f) 15 cm

在圆周方向趋于均匀,计算结果与图 6(e)的测量结果一致。由图 6(c)可见,当 $L=50\text{ cm}$ 时,近轴区域水平方向的低谷和垂直方向的高峰已接近轴心,并且幅度都已不显著,离轴区域光强分布在圆周方向仍然保持均匀。图 6(f)表明当 $L=15\text{ cm}$ 时,近轴区域水平方向的低谷和垂直方向的高峰幅度已经不显著,这可能是由于图 6(c)的计算结果未考虑模式间的耦合,而图 6(f)的实验样品中存在模式耦合,从而使近轴区域的光强起伏在传输较短的光纤距离后就趋于平缓。

4.2.3 电磁场模式理论的定性分析

受激光纤在近轴区域和离轴区域的光功率分布,在圆周方向的均匀性随着 L 的增加而趋于均匀的现象也可以用电磁场模式理论进行定性分析。由于圆光纤的导波模具有轴对称性,并且非简并模式的传播常量存在差异。在 L 较小时,由于模式场的相干叠加使光功率分布沿圆周方向呈现起伏。当 L 较大时,所有模式的相位随机地分布于 $(0, 2\pi)$ 区间内,大量的具有轴对称分布的模式场的随机叠加使光功率分布沿圆周方向的均匀性提高。

5 弯曲受激光纤的光功率分布

测量了中心激励条件下弯曲受激光纤的出射端光功率分布。受激光纤长度为 20 cm ,两端各有 3 cm

的直连接段,中间部分固定在具有特定曲率半径的模板上。实验所用光纤的 3 dB 弯曲损耗临界曲率半径为 $1.75\text{ cm}^{[12]}$ 。图 7 为受激光纤弯曲示意图。

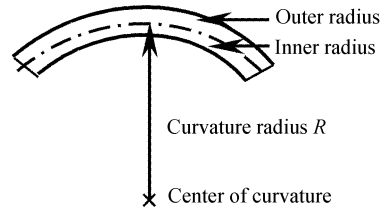


Fig. 7 Illustration of fiber bending

图 8 为中心激励的弯曲受激光纤出射端的光功率分布,受激光纤的长度为 20 cm 。图 9 为出射端曲率平面内的光功率分布,图中曲率中心位置根据光纤包层中倏逝场确定。图 8(c)中,当 $R=15\text{ cm}$ 时,光功率分布与受激光纤未弯曲时的光功率分布[图 5(a)、图 5(e)]基本一致,由图 9 可见光功率分布稍微偏向曲率外侧。图 8(b)中,当 $R=10\text{ cm}$ 时,光功率分布已显著偏向曲率外侧,由图 9 可见光强峰向曲率外侧偏移约为 $100\text{ }\mu\text{m}$,光功率分布与 $R=15\text{ cm}$ 时相比没有显著展宽。由图 8(a)、图 9 可见,当 $R=5\text{ cm}$ 时,光功率分布显著展宽,光功率分布中心向曲率外侧偏移略少于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。这是由于当 $R=5\text{ cm}$ 时弯曲半径已接近于临界曲率半径,光功率分布的展宽是由于光纤弯曲导致的模式耦合造成的,并且模式耦合也使得弯曲导致的光功率分布向曲率外侧的偏移作用减弱。

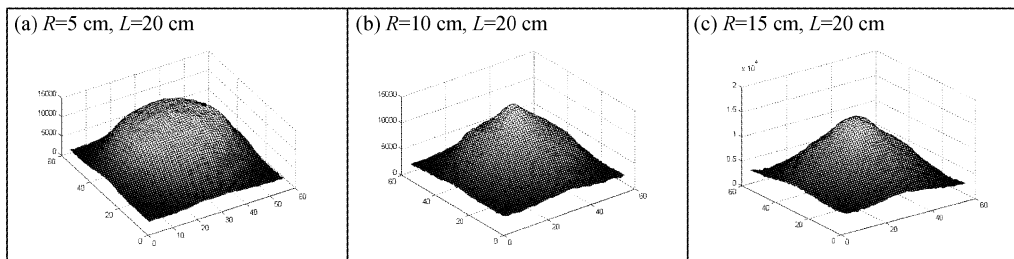


Fig. 8 Output intensity distribution of curved fibers under center latching

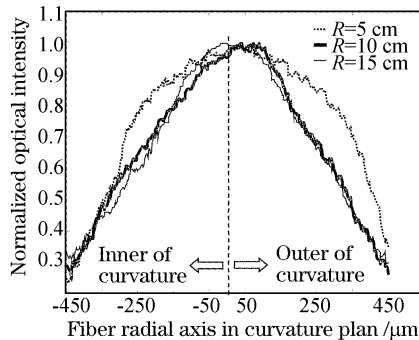


Fig. 9 Output intensity distribution on the curvature plane of the curved fibers under center latching

综合上述三种情形可知:对于中心激励的光纤,当受激光纤弯曲半径远大于临界曲率半径时,模式耦合较弱,光功率分布无显著展宽,光功率分布随曲率半径的减小而向曲率外侧偏移;当受激光纤弯曲半径接近于临界曲率半径时,模式耦合显著增强,造成光功率分布显著展宽,光功率分布向曲率外侧略有偏移。

从实际应用的角度考虑,中心激励条件下受激光纤的弯曲致使光功率分布向曲率外侧偏移。在弯曲光纤与后续直光纤的连接处,对后续光纤形成偏心激励。因此,实际应用中,偏心激励有可能不必通

过偏心对准装置实现,而可以简单地通过弯曲受激光纤到指定的曲率半径来实现。

结论 对偏心激励的多模聚合物光纤的光功率分布进行了数值仿真和实验测量,结果一致地表明:随着激励源偏心距的增加,光功率分布的峰值由光纤轴心向外偏移;在激励源偏心距相同的情况下,光功率分布在圆周方向的均匀性随着受激光纤长度的增加而趋于均匀;在受激光纤长度较短时近轴区域存在较大的光功率起伏,传播距离大于15 cm后趋于均匀。对偏心激励的弯曲受激光纤的光功率分布进行了测量,结果表明:对于中心激励的光纤,当受激光纤弯曲半径远大于临界曲率半径时,模式耦合较弱,光功率分布无显著展宽,光功率分布随曲率半径的减小而向曲率外侧偏移;当受激光纤弯曲半径接近于临界曲率半径时,模式耦合显著增强,造成光功率分布显著展宽,光功率分布向曲率外侧略有偏移。

参 考 文 献

- van den Boom H P A, Li W, van Bennekom P K *et al.*. High-capacity transmission over polymer optical fiber. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2001, **7**(3): 461~470
- Yang Chun, Sun Xiaohan *et al.*. 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9): 1116~1122 (in Chinese)
- Yao Li. An overview of NECI projects on thin-cladding POF-based optical interconnects. *Proc. SPIE*, 1999, **3632**: 70~77
- Jun Ai, Yao Li. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1024~1028
- Xu Xingsheng, Wang Zhuo, Ma Hui *et al.*. 100 Mb/s polymer optical fiber communication link system. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(1): 38~40 (in Chinese)
- Li Gubo, Ge Wenping, Hao Sujun *et al.*. Adjustable coupling effect of plastic fiber dual taper and semisphere cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(8): 941~944 (in Chinese)
- Ge Wenping, Li Zhonghui, Yin Zongmin *et al.*. A novel 1×4 plastic optical fiber power coupler. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(8): 961~963 (in Chinese)
- Raddatz L, White I H, Cunningham D G *et al.*. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3): 324~331
- Zhang Shuangbing, Zhang Xiaoxi. Er-doped optical fiber amplifier. *Patent of China* (01244678.5), 2002
- Achenbach C P, Cobb J H. Computational studies of light acceptance and propagation in straight and curved multimode active fibres. *J. Opt. (A): Pure and Appl. Opt.*, 2003, **5**(3): 239~249
- Badar A H, Maclean T S M, Ghafouri-Siraz H *et al.*. Bent slab ray theory for power distribution in core and cladding of bent multimode optical fibres. *IEE Proceedings, Part J: Optoelectronics*, 1991, **138**(1): 7~12
- Gloge D. Bending loss in multimode fibers with graded and ungraded core index. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2506~2513
- Hunsperger R G. *Integrated Optics: theory and technology*, 5th ed., Germany, Heidelberg: Springer, 2002. 114~115