

# 单模激光在多模光纤中的传输实验研究

陈寒 邹淑珍 于海娟 林学春

中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083

**摘要** 采用 CCD 光束分析仪研究经大芯径多模光纤传输后的出射光束, 从输出光斑能量分布及出射光束质量两方面进行讨论, 得到多模光纤的光传输特性。实验中以单模激光作为测试光源, 进行了不同芯径及长度的多模光纤的传输实验。结果表明: 多模光纤对入射光束具有整形作用, 主要表现为光束质量下降, 能量分布趋向均匀化。且光束质量恶化程度及光束匀化效果与传输用的多模光纤参数相关: 光纤芯径越大, 传输后的光束质量下降得越多, 匀化效果越明显。多模光纤的传输长度同匀化效果亦呈正相关关系。多模光纤的匀化作用可为单模光源提供一种简单、有效的整形方案。通过选择不同参数的多模光纤可获得不同特性的准均匀光束, 以适应特殊的激光加工需求。

**关键词** 光纤光学; 传能光纤; 能量分布; 光束质量; CCD 光束分析仪模式激发; 模式耦合

**中图分类号** TN012 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.040602

## Experimental Study of the Transmission in Multimode Fiber with a Single Mode Laser

Chen Han Zhou Shuzhen Yu Haijuan Lin Xuechun

Laboratory of All-Solid-State Light Source, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100083, China

**Abstract** The transmitted beam through the large-core multimode fiber is investigated by using CCD beam profiler. The energy distribution and beam quality are discussed, thus the transmission characteristics of the multimode fiber are obtained. The single mode laser is chosen as a testing light source, and the study is conducted by applying multimode fiber with different core diameters and lengths. The results show that the multimode fibers have shaping effect on the input beam including beam quality degradation and homogenization of the energy distribution. Besides, the deterioration of the beam quality and the homogenization effect have dependence on the parameters of the multimode fiber. The larger diameter of the multimode fiber leads to more serious deterioration of the beam quality as well as better homogenization effect. A positive correlation between the transmitting length and the homogenization effect is also found. This study can provide a simple and effective scheme for the shaping of the single mode laser. By selecting multimode fibers with various parameters, the quasi uniform beams with different characteristics can be got to meet special laser processing demand.

**Key words** fiber optics; power delivery fibers; energy distribution; beam quality; CCD beam profiler; mode exciting; mode coupling

**OCIS codes** 140.3325; 140.3510; 060.3510

## 1 引言

多模光纤基于大芯径、高数值孔径(NA)的特点, 在光纤传能方面具有迅速对准、低损耗等优势, 广泛应用于激光加工<sup>[1-2]</sup>、激光医疗、激光点火<sup>[3]</sup>、大气通信<sup>[4]</sup>等领域。齐晓玲等<sup>[5]</sup>测量了 LED 经过多模光纤传输后的出射光束的光强分布, 并分析指出这种光强分布有利于提高光耦合效率, 可应用于全光交换系统。吴丽双等<sup>[6]</sup>以半导体激光器(LD)作光源, 研究其经过 D 形多模光纤的输出光场, 证明了非圆柱型多模光纤更有利于

收稿日期: 2014-10-17; 收到修改稿日期: 2014-11-08; 网络出版日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(61308032)

作者简介: 陈寒(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: chenhan@semi.ac.cn

导师简介: 林学春(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率全固态激光器方面的研究。E-mail: xclin@semi.ac.cn

(通信联系人)

模式混合,输出光斑的均匀性更佳,更适宜用作大气激光通信系统中的光源。Kuhn等<sup>[7]</sup>以多模光源作为测试源,实验研究了大芯径多模光纤的芯径及弯曲曲率半径对出射光的光束质量及能量分布的影响,用于指导激光加工领域中传能光纤的选择。然而,鲜有单模激光经大芯径多模光纤传输后,对其出射光束特性的系统性研究。本实验则以氦氖激光作为测试源,比较分析了多模光纤的芯径以及传输长度对其出射光束特性的影响。实验结果表明:单模激光在多模光纤中不能保持其基模特性;经多模光纤传输后的出射光束为准均匀光束;且随着光纤芯径及传输长度的增加,匀化效果增强。

整形加工可用来优化激光源的光束性质,包括改变光斑形状、匀化光斑能量分布等,因而备受关注。针对一些特殊的加工应用,高斯强度分布的激光束并非是加工的最优选择。例如,在薄膜型电子与光伏器件的制造中,使用强度均匀分布的激光对其进行划片切割,可显著提高切割速度与边缘切割质量<sup>[8]</sup>。现有的一些激光束整形技术包括利用光阑法可以选择得到光束中心近平顶部分,但是此时会产生很高的能量损耗<sup>[9]</sup>;衍射型或折射型光学元件<sup>[10]</sup>也可以改变光束强度分布,但其需要制作精细结构,且其要求对入射光进行高精度准直,具有高成本、操作复杂的缺点。为了克服以上技术的劣势,基于光纤的匀化研究已有包括卤化银光纤探针<sup>[11]</sup>、凹面光纤探针<sup>[12]</sup>、大数值孔径的微结构多模光纤<sup>[13]</sup>、空芯多模光纤<sup>[14]</sup>、拉锥光纤<sup>[15]</sup>及长周期光纤布拉格光栅<sup>[16]</sup>的匀化实验。这些整形技术是基于一些特种光纤或精细的光纤加工工艺。相较于以上的整形方法且据本文的实验结果,普通大芯径多模光纤的匀化作用可为单模光源提供一种简单、有效的整形方案,以此改善与拓宽单模光源的应用。

## 2 单模激光在多模光纤中的传输原理

单模激光在多模光纤中的传输是模式激发与模式叠加的过程。单模光在多模光纤的入射端面上激发了高阶模式,描述如下:

$$E_{in}(x, y, z=0) = \sum_1^M \sum_1^N C_{MN} e_{MN}(x, y, z=0), \quad (1)$$

式中  $E_{in}(x, y, z=0)$  表示入射光场,  $e_{MN}(x, y, z=0)$  是在入射端面处被激发的各阶传导模式。 $MN$  是在多模光纤内被激发的总模式数,  $C_{MN}$  是模式扩展系数,可表示为

$$C_{MN} = \frac{\iint_s E_{in}(x, y, 0) \times e_{MN}^*(x, y, 0) ds}{\iint_s |e_{MN}(x, y, 0)|^2 ds}. \quad (2)$$

所有的被激发模式在多模光纤中独立传播,在多模光纤输出端面上的场  $E_{out}(x, y, L)$  是各激发模式的叠加,描述如下:

$$E_{out}(x, y, L) = \sum_1^M \sum_1^N C_{mn} e_{mn}(x, y, 0) \exp(-i\beta_{mn} L), \quad (3)$$

其中  $\beta_{mn}$  是在多模光纤中被激发的第  $mn$  阶模式的传输常量。根据(3)式,可得到经多模光纤传输后,出射端面的光场由光纤长度  $L$ 、模式扩展系数  $C_{MN}$ 、传输常量  $\beta_{mn}$  共同决定。其中模式扩展系数  $C_{MN}$  与多模光纤的芯径有关,传输常量  $\beta_{mn}$  与传输波长有关。因此,出射光束特性与光纤长度  $L$ 、多模光纤的芯径以及传输波长都相关。本文主要研究光纤长度  $L$  及多模光纤的芯径对出射光束特性的影响。

## 3 实 验

实验装置如图1所示。所用单模光源是北京大学JDW-3型氦氖激光器,波长为632.8 nm。采用单透镜将激光耦合入多模光纤,该耦合透镜焦距  $f$  为125 mm。经透镜会聚后的出射光束腰斑直径为200  $\mu\text{m}$ ,远场发散角为4.2 mrad。所用多模光纤输入端固定于多维光纤调整架上,且输入端处于耦合透镜出射光束的焦点附近。利用光束分析仪(Ophir Spiricon)观察经多模光纤传输后的出射光束光斑。在上述实验装置下,进行了以下对比实验:使用相同长度为2 m、不同芯径为200、400、600  $\mu\text{m}$ 的多模光纤,研究芯径对输出光斑能量分布及出射光束质量的影响;使用不同长度的芯径为400  $\mu\text{m}$ 的多模光纤,研究单模光束在多模光纤中的传输演化过程。实验所用多模光纤折射率均为阶跃型分布,纤芯数值孔径均为0.22,使用光纤切割机

(Vytran)处理输入及输出端面,盘绕直径均为30 cm可以消除宏观弯曲造成光纤传输过程中附加的能量损耗和激光模式耦合<sup>[17]</sup>。

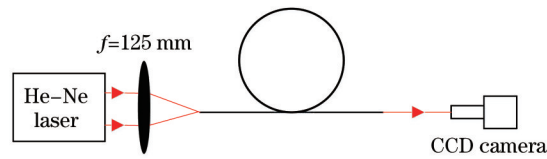


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 不同芯径多模光纤出射光束特性

采用CCD光束分析仪测量了入纤前及经过多模光纤传输后的激光光束截面能量分布情况,如图2、图3所示。图2中显示测试光源为基模强度分布,中心能量最高,能量的径向梯度明显。图3(a)~(c)分别为芯径 $2a$ 为600、400、200  $\mu\text{m}$ 的多模光纤的输出端的能量分布,3个光斑的放大倍率相同。

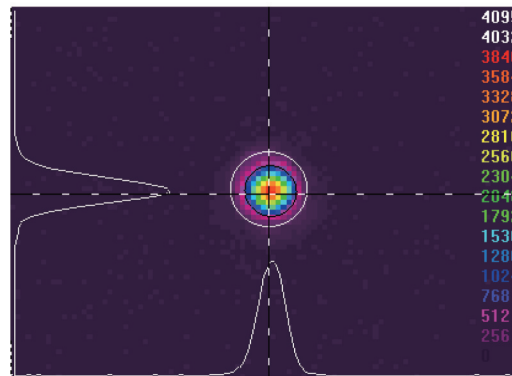
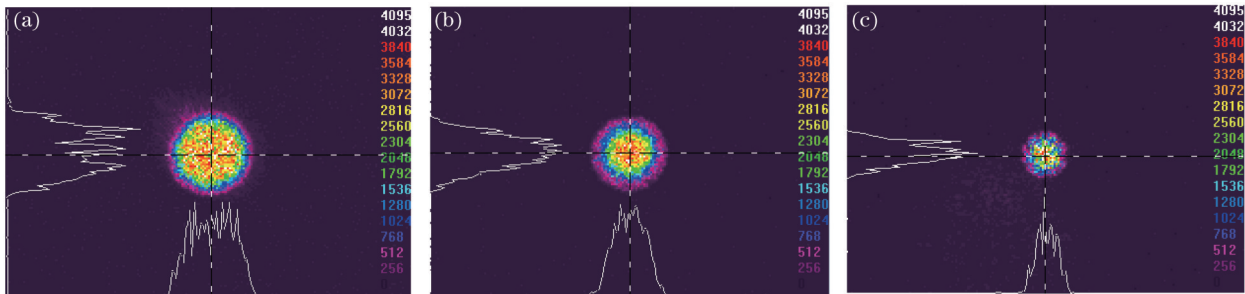


图2 入纤前光斑能量分布

Fig.2 Energy distribution of light spot before injected into the fiber

图3 单模光源经不同芯径 $2a$ 的多模光纤的输出光斑。(a)  $2a=600 \mu\text{m}$ ; (b)  $2a=400 \mu\text{m}$ ; (c)  $2a=200 \mu\text{m}$ Fig.3 Output light spots of a single mode laser through multimode fibers with different core diameters. (a)  $2a=600 \mu\text{m}$ ; (b)  $2a=400 \mu\text{m}$ ; (c)  $2a=200 \mu\text{m}$ 

从图3可以看出,单模光经过不同芯径的多模光纤传输后,其共同特征为输出光斑充满相应传输光纤的芯区,能量分布趋向均匀化,变成准均匀光束。这是由于多模光纤相较于单模光纤,其可传导模数量增大;且二者存在模场失配,使得光纤中的高阶模式被激发<sup>[18]</sup>,导致能量在基模与各高阶模式中重新分配,最终光纤出射的光束能量分布是各阶模式的叠加结果<sup>[19]</sup>,能量由中心沿径向流动扩散。此外,实验中所使用的CCD分析软件显示的一维强度曲线表现出横向展宽,其宽度同传输光纤芯径呈正相关关系,传输光纤的芯径越大,强度分布曲线的展宽越大,且该一维强度曲线还呈现出多个尖峰结构。这是由于激光的相干性导致了干涉散斑,造成光纤强度分布不平滑<sup>[20]</sup>。

值得注意的是,比较图3(a)、(b)与(c)可见,600  $\mu\text{m}$ 芯径多模光纤输出光斑的红色强度区域的离散度高,红色强度与黄色强度区域的混合度也高。光纤芯径 $2a$ 与可传导模式数量 $M$ 之间的关系描述如下:

$$M = \frac{V^2}{2}, \quad (4)$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5)$$

式中  $V$  是光纤的归一化频率,  $n_1$ 、 $n_2$  分别是光纤芯区与包层的折射率, 可以得到传输光纤芯径越大, 可支持的模式数量则越多。并且多模光纤芯径与光纤端面的入射光斑直径的比值越大, 在多模光纤内激发的模式数量就越多<sup>[21-22]</sup>。所以, 在相同传输长度及激励条件下, 芯径越大的多模光纤可以激发出更多的模式, 导致匀化效果就愈加明显, 因而出现了上述强度分布上的差异。同时, 实验中发现, 对光纤的任意部分施加干扰或者压力, 比如弯折、振动等, 输出光斑会变大变暗, 匀化效果增强。这是因为引入一种扰模机制, 导致更多高阶模式激发, 并使各模式之间产生强烈耦合<sup>[11]</sup>, 但不可避免会引入传输能量的损耗而导致光斑变暗。

实验中对不同芯径多模光纤的输出光束质量进行了测量(见表1)。由表1可见, 光束质量的恶化与使用的多模光纤参数相关。多模光纤的芯径越大, 输出光束质量下降得越多。

表1 不同芯径多模光纤输出光束质量

Table 1 Output beam quality of multimode fibers with different core diameters

Core diameter / $\mu\text{m}$	Length /m	$M^2$
200	2	29
400	2	63
600	2	95

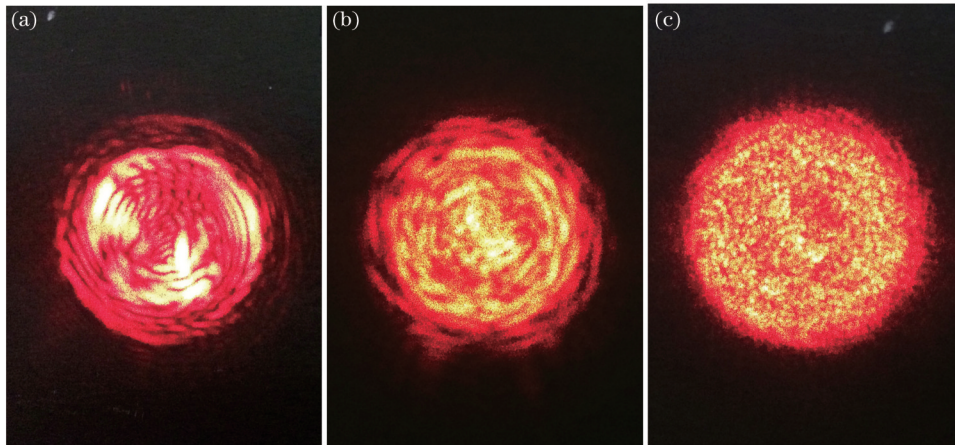


图4 单模光源经不同长度的多模光纤的输出光斑。(a)  $L=10$  cm; (b)  $L=30$  cm; (c)  $L=2$  m

Fig.4 Output light spots of a single mode laser through multimode fibers with different transmission lengths.

(a)  $L=10$  cm; (b)  $L=30$  cm; (c)  $L=2$  m

#### 4.2 单模光源在多模光纤中的传输演化过程

如图4所示, 单模光束经不同长度多模光纤的远场光斑图, 可以看出传输长度对出射光束特性有很大的影响。图4(a)~(c)分别对应长度为10 cm、30 cm、2 m的多模光纤, 芯径均为400  $\mu\text{m}$ 。实验结果表现为: 经过10 cm的多模光纤传输后, 出射光束呈现出类似无衍射贝塞尔光束的光强分布特征。当传输长度为30 cm时, 出射光束的同心圆环特性减弱。

当传输长度为2 m时, 已能显现出能量分布朝着匀化的趋势发展, 观察到无规则分布的亮暗斑点, 表现出激光散斑特性。实验中2 m长的光纤被盘绕, 打破了波导的圆柱对称结构, 激发了非共轴模式; 且随着传输长度的加大以及弯曲作用, 模式数量增加, 且各阶模式之间的耦合更充分, 导致模式间的能量分布趋于均衡, 相较于10 cm及30 cm的多模光纤传输结果, 出射光斑的均匀度提高。

光在多模光纤中传输是一个多模干涉的过程。10 cm和30 cm的多模光纤在实验中处于平直放置状态, 基于对称共轴激发以及模式正交特性,  $\text{LP}_{0m}$  模式优先被激发<sup>[22]</sup>。当模式数量较少且主要为共轴模式时, 各模式之间以相干叠加为主, 出射光斑相干度高, 呈现圆环条纹。随着传输光纤加长, 传导模式数量增加。由于各模式的传输常量差异大, 所以各模式之间发生非相干叠加, 出射光斑相干度退化, 呈现散斑特性。各

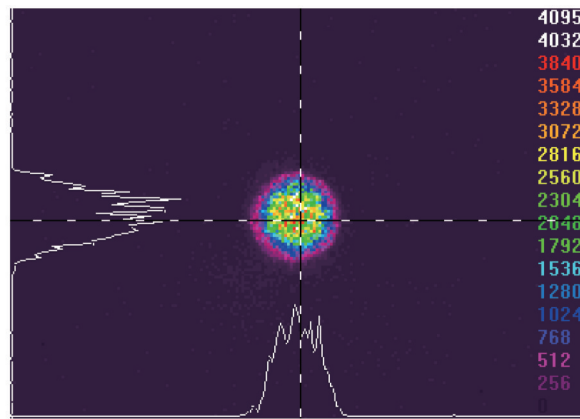


图5 单模光源经长度为9.5 m、芯径400  $\mu\text{m}$ 的多模光纤输出光斑

Fig.5 Output light spot of a single mode laser through a multimode fiber with core diameter of 400  $\mu\text{m}$  and transmission length of 9.5 m

模式在光纤轴向不同横截面处产生随机的相位差,导致多模干涉的结果与传输距离相关,从而获得随长度变化的出射光斑<sup>[23]</sup>。实验中增加了一组长度为9.5 m、芯径为400  $\mu\text{m}$ 的多模光纤传输实验,出射光斑如图5所示。将其与图3(b)中经长度为2 m、芯径为400  $\mu\text{m}$ 的多模光纤后的输出光斑进行比较,可看出匀化度上升。

根据以上实验结果,芯径和传输长度同模式数量的增加以及各模式之间的耦合程度呈正相关关系。实验中使用长度为9.5 m、芯径为800  $\mu\text{m}$ 的多模光纤获得了较好的匀化效果,如图6所示。

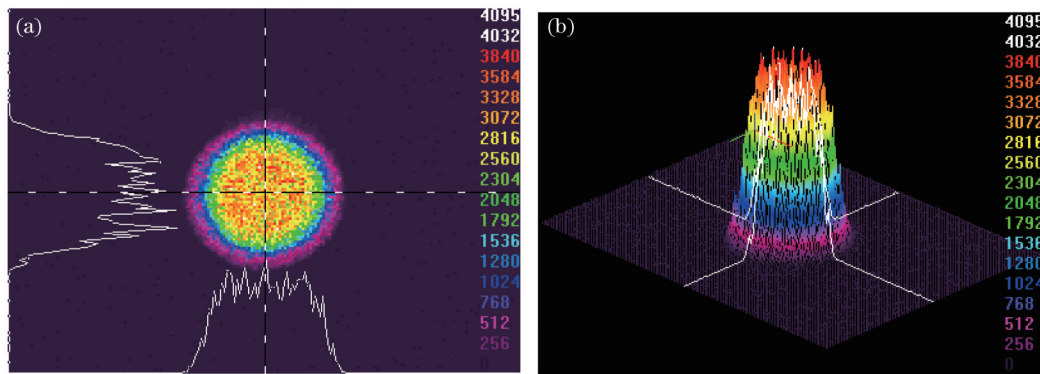


图6 单模光源经长度为9.5 m、芯径800  $\mu\text{m}$ 的多模光纤输出光斑

Fig.6 Output light spot of a single mode laser through a multimode fiber with core diameter of 800  $\mu\text{m}$  and transmission length of 9.5 m

## 5 结 论

采用CCD光束分析仪研究单模光束经过不同芯径的多模光纤后出射的光束特性。单模光束在大芯径多模光纤中的传输过程包括了多个模式的激发与多模干涉效应,由于这两者与大芯径多模光纤的芯径及传输长度密切相关,导致出射光束特性存在差异,即出射光束可通过芯径与长度这两个变量实现可控。此外,实验获得的输出光斑强度曲线顶部呈现“毛刺”。这种现象是由于入射光光束质量好,为非完全填充状态激励,被激发的高阶模式有限,且为低级次的高阶模式,所以出射光束具有相干性,产生了干涉散斑,导致平滑度变差。若要求改善整形效果,可通过改变大芯径多模光纤的结构,例如纤芯截面的形状、光纤拉锥等来实现。

## 参 考 文 献

- 1 N Reng, T Beck, M Ostermeyer. Comparison of different types of fibers for high power CW Nd:YAG lasers [C]. SPIE, 1994, 2206: 443-454.
- 2 B V Hunter, K H Leong, C B Miller, *et al.*. Selecting a high-power fiber-optic laser beam delivery system [C]. In Proceedings of ICALEO'96, 1996, 81: 173-182.

- 3 S Joshi, N Wilvert, A P Yalin. Delivery of high intensity beams with large clad step-index fibers for engine ignition [J]. *Appl Phys B*, 2012, 108(4): 925-932.
- 4 Peng Renjun, Wu Jian. Employing multi-mode fiber to form partially coherent light source for atmospheric optical communication [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(6): 813-816.  
彭仁军, 吴健. 多模光纤产生用于大气光通信的部分相干光源[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(6): 813-816.
- 5 Qi Xiaoling, Wang Fujuan, Cai Zhigang, *et al.*. Intensity distribution of transmitted beam of multimode optical fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(2): 117-130.  
齐晓玲, 王福娟, 蔡志岗, 等. 多模光纤出射光束光强分布的研究[J]. *半导体光电*, 2003, 24(2): 117-130.
- 6 Wu Lishuang. Experimental study of the characteristics of the light field of the laser output through the D-shaped multimode fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090603.  
吴丽双. 激光经D形多模光纤输出的光场特性实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090603.
- 7 A Kuhn, I J Blewett, D P Hand, *et al.*. Beam quality after propagation of Nd:YAG laser light through large-core optical fibers [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(36): 6754-6760.
- 8 U Umhofer, E Jager, C Bischoff. Refractive and diffractive laser beam shaping optics [J]. *Laser Technik Journal*, 2011, 8(3): 24-27.
- 9 F M Dickey, L S Weichman, R N Shagam. Laser beam shaping techniques [C]. SPIE, 2000, 4065: 338-348.
- 10 Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0102005.  
刘志辉, 杨欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102005.
- 11 Y Matsuura, M Miyagi, A German, *et al.*. Silver-halide fiber tip as a beam homogenizer for infrared hollow waveguides [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(17): 1308-1310.
- 12 M Mayeh, F Farahi. Tailoring Gaussian laser beam shape through controlled etching of single-mode and multimode fibers: simulation and experimental studies [J]. *IEEE SENS J*, 2012, 12(1): 168-173.
- 13 J R Hayes, J C Flanagan, T M Monroe, *et al.*. Square core jacketed air-clad fiber [J]. *Opt Express*, 2006, 14(22): 10345-10350.
- 14 Y Matsuura, D Akiyama, M Miyagi. Beam homogenizer for hollow-fiber delivery system of excimer laser light [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(18): 3505-3508.
- 15 Z Tian, M Nix, S S H Yam. Laser beam shaping using a single-mode fiber abrupt taper [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 229-231.
- 16 X Gu, W Mohammed, L Qian, *et al.*. All-fiber laser beam shaping using a long-period grating [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(13): 1130-1132.
- 17 Xu Shixiang, Li Xishan, Zhang Guoxuan. The effects of bending on the transmission properties of pure silica optical fibers [J]. *Chinese J Lasers*, 1994, 21(7): 571-575.  
徐世祥, 李锡善, 张国轩. 纯石英光纤的弯曲传输特性实验研究[J]. *中国激光*, 1994, 21(7): 571-575.
- 18 Huang Zejia, Li Qiang, Xu Yaqin, *et al.*. Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0605001.  
黄泽钺, 李强, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605001.
- 19 Li Jie, Zhao Haichuan, Chen Zilun, *et al.*. Beam cleanup of a multimode fiber seeded by an off-center single-mode laser source [J]. *Optik*, 2013, 124(16): 2501-2503.
- 20 Li Li, Han Xueqin, Zhao Shiwei, *et al.*. Laser beam homogenization assessment based on uniformity and stationarity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 011401.  
李丽, 韩学勤, 赵士伟, 等. 基于均匀度和平稳度的激光光束匀化性评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 011401.
- 21 X Zhu, A Schülzgen, H Li, *et al.*. Detailed investigation of self-imaging in large-core multimode optical fibers for application in fiber lasers and amplifiers [J]. *Opt Express*, 2008, 16(21): 16632-16645.
- 22 X Zhu, A Schülzgen, H Li, *et al.*. Coherent beam transformations using multimode waveguides [J]. *Opt Express*, 2010, 18(17): 7506-7520.
- 23 X Zhu, A Schülzgen, L Li, *et al.*. Generation of controllable nondiffracting beams using multimode optical fibers [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(20): 201102.