

文章编号 1004-924X(2019)02-0287-08

锥形光纤在空间光通信耦合系统中的应用

闫宝罗, 李晓龙, 张红伟, 刘海锋, 段少祥, 刘 波*

(南开大学 现代光学研究所 天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 为了提高自由空间光通信的接收端耦合效率, 将锥形光纤应用于光耦合, 依据 BPM 算法的仿真结果使用熔融拉锥法制备了满足低损传输条件的锥形光纤。在实验上研究了锥形光纤和双锥形光纤模场传输特性。通过静态空间光-光纤耦合实验, 对比了多/单模熔接光纤和锥形光纤光耦合效率和传输效率的差异, 并研究了以上两种光纤结构耦合效率的横向偏移量容差。结果表明, 锥形光纤的传输效率约为 70%, 具有低损传输特性、用于匹配后端单模光电子器件的良好滤波特性以及相比普通光纤更高的横向偏移量容差特性, 因此可以广泛应用于自由空间光通信接收端光耦合、模式转换器等方面。

关键词: 自由空间光通信; 锥形光纤; 模场分析; 耦合效率; 传输效率

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20192702.0287

Application of tapered fibers to free-space optical communication coupling system

YAN Bao-luo, LI Xiao-long, ZHANG Hong-wei, LIU Hai-feng, DUAN Shao-xiang, LIU Bo*

(Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

* Corresponding author, E-mail: liubo@naikai.edu.cn

Abstract: Free-space optical communication has many advantages over traditional communication. Improving the coupling efficiency of free-space optical communication (FSOC) receivers is of great significance for the quality of communication. We used tapered fibers in optical coupling. Based on the simulation results using the BPM algorithm, tapered fibers with low loss transmission were prepared using a fusion taper method. First, the mode field transmission characteristics of the tapered fibers and double tapered fibers were studied. Second, the difference in coupling efficiency and transmission efficiency between multi/single mode fused fibers and tapered fibers was studied using a static spatial light-fiber coupling experiment. The lateral offset tolerances of the coupling efficiency of these two fiber structures were also studied. The results show that the tapered fibers have good filtering characteristics for matching single-mode optoelectronic devices in the back end. They also have higher lateral offset tolerance characteristics than common fibers and a high transmission efficiency of around 70% that demonstrates low-loss transmission characteristics. Therefore, tapered fibers can be widely

收稿日期: 2018-09-21; 修订日期: 2018-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (No. 61727815); 天津市科技支撑计划资助项目 (No. 16YFZCSF00400)

applied in the optical coupling of FSOC receivers and mode converters.

Key words: free-space optical communication; tapered fiber; mode field analysis; coupling efficiency; transmission efficiency

1 引言

激光通信具有通信频带宽、抗干扰能力强、光学增益大、体积小等优点^[1-2],目前朝着高速、高容、长距离的方向发展。基于激光通信的自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSOC)被应用在星-地光通信、建筑间光纤通信链路替代、军事高速率移动通信链路等,近些年来受到了广泛的研究^[3-4]。

典型的自由空间光通信系统包括光发射系统、空间信道、光接收系统和光捕跟系统(APT)等。其中 APT 系统用于实现空间光对准,是建立光链路的核心。空间光耦合系统的目的是为了将信号光尽可能地耦合进接收端光器件,属于 APT 子系统。当接收端望远镜完成粗瞄建链后,如何将动态空间光耦合进入后端光纤实现高、稳定的耦合效率是一个难题。为了解决这个问题,快速转向镜(FSM)、压电陶瓷(PZT)等结合传感器(如波前传感器、位置传感器等)被用来实现光束和光纤的耦合,构成光学自适应系统^[5-6]。而 FSOC 接收端的光电子器件一般为单模传输^[7],把光束耦合进模场直径约为 $9\ \mu\text{m}$ 左右的单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)会导致该系统光耦合效率的位移容差极小,在通信过程中,激光收发组件的视角偏离、转台振动、大气湍流^[8-9]等因素,严重影响了接收端空间光-光纤耦合效率,从而影响了通信质量。

多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF)由于模场直径大,可以有效提高光纤接收光的范围,但由于其存在较多的模式色散,难以实现长距离传输,同时还存在和后端单模器件匹配的问题。而锥形光纤的特点是其芯径与包层等比例减小,锥区芯径甚至可达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,此时处于微纳量级的锥形光纤具有良好的非线性效应且对一些物理量极其敏感,因此被广泛应用于光纤传感、超低阈值激光器、光纤参量振荡器、微腔实验、光纤耦合和超连续谱等领域^[10-16]。

在锥形光纤研究方面,1987 年 J. D. Love 等^[17]在理论上研究了锥形光纤滤除高阶模的特性。Gang Yun 等^[18]将锥形光纤用于空间光耦

合,指出锥形光纤具有低损传输和提高接收光角度容差的特性。Yi Yang 等^[19]使用有限元仿真软件得到锥形光纤的传输效率可达 95% 左右,说明锥形光纤具有低损耗传输特性。最近, Q. G. Hu 等^[20]等优化锥形光纤的几何尺寸,实验上将锥形光纤的空间光耦合效率提高至 55%。闫亚东等^[21]设计的干涉仪系统接收端采用锥形光纤,保证了靶面运动过程中信号光的有效耦合。

本文基于仿真结果,熔融拉锥法制备了低损锥形光纤,研究了锥形光纤和双锥形光纤模式的传输特性,对比分析了 SMF、不同芯径 MMF、锥形光纤和多/单模熔接光纤的空间光耦合特性以及耦合效率对入射光的横向偏移量容差特性。

2 锥形光纤模场分析实验

2.1 模场分析实验系统

锥形光纤模场分析示意图如图 1 所示。光源输出 $1\ 550\ \text{nm}$ 光由 SMF 输出至熔接机一端,另一端是实验中待测的光纤(实验一: SMF; 实验二: MMF; 实验三: 锥形光纤; 实验四: 双锥形光纤)。通过多模光纤和单模光纤错位熔接激发出高阶模在光纤内传输,输出端通过显微物镜扩束至近红外相机,通过模场分析仪分析输出模场。

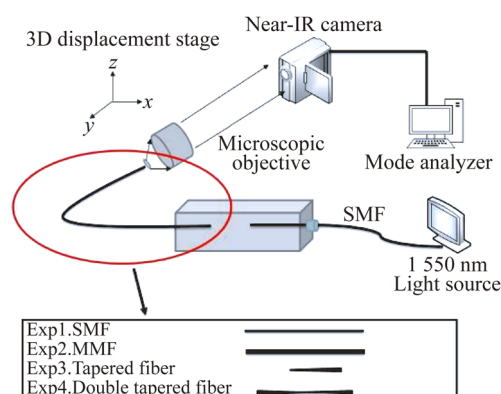


图 1 模场分析实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mode field analysis experiment

2.2 实验结果分析

基于图 1 所示的实验装置,分别测试了

SMF、MMF、锥形光纤、双锥形光纤出射的模场, 实验中, 待测光纤端面位于显微物镜前, 实验光纤的长度控制在 30 cm 左右。实验结果如图 2 所示。实验一中 SMF(图 2(a)) 出射端的模场呈基模分布, 作为对比实验。实验二中 MMF(图 2(b)) 出射端出现多模分布, 证明多模光纤和单模光纤熔接激发了高阶模。实验三将实验二中的 MMF 通过熔融拉锥法制备成锥形光纤, 其模场如图 2(c) 所示。测试中锥区位于显微物镜前, 对比 SMF 的模场, 可以得到大部分高阶模已被滤除, 虽然相比基模分布而言存在一些散斑, 但足以证明锥形光纤具有较好的滤波特性。最后, 双锥形光纤出射端模场呈现多种模式分布, 如图 2(d) 所示, 其外部浅蓝色的区域为光纤包层模。

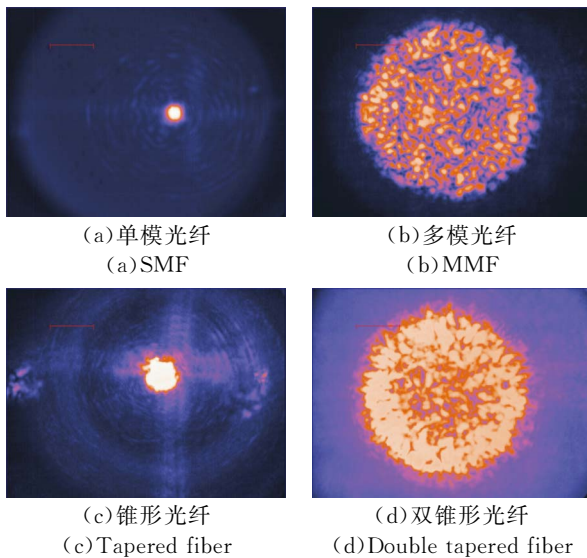


图 2 出射模场
Fig. 2 Mode fields

为了进一步研究双锥形光纤内光模场的传输特性和输出的稳态场, 实验中使用宝石刀对双锥形光纤进行逐段切割(如图 3 所示), 并观察其出射模场。在双锥形光纤的未拉锥区, 本文取两段不同位置处的出射模场, 它呈现强度较对称的多模分布, 模式分配达到稳态。而锥区部分呈现强度不对称的多模分布, 反映了一些高阶模被滤除的现象。在锥腰部分, 大部分高阶模式被滤除, 呈现出基模的分布。这是由于当入射光从未拉锥区入射锥形光纤到达锥腰部分时, 大部分高阶模被滤除, 而从锥腰到另一端未拉锥区出射时, 由于该光纤归一化传播常数 V 增大, 可以传输的高阶模式数量增多, 重新激发出高阶模, 从而在出射端模场呈现多模分布。

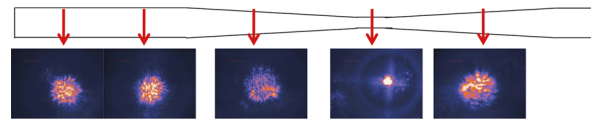


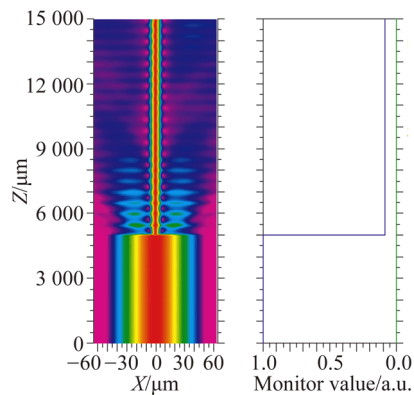
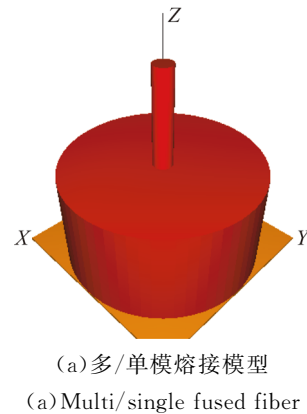
图 3 双锥形光纤模场的传输特性
Fig. 3 Transmission characteristics of double tapered fiber

3 空间光-光纤耦合实验

3.1 理论模型分析

对于自由空间光接收端耦合部分, 使用大芯径的 MMF 进行光耦合以达到大范围空间光接收时, 需要考虑后端单模器件模场失配导致的损耗, 这里使用多/单模熔接模型来表示。

多/单模熔接模型是将 MMF 与 SMF 连接, 主要损耗来源于模场直径不同导致的约 10 dB 的耦合损耗和手动熔接损耗。如图 4 所示, 基于 BPM 算法, 在 Rsoft 软件中对多/单模熔接模型建模, 并仿真其基模传输时模场和归一化功率的分布特点, 可以清楚看出损耗主要来源于熔接点处。



(b) 基模传输特性及归一化功率分布
(b) Transmission characteristics of basic mode and normalized power distribution

图 4 多/单模光纤仿真分析

Fig. 4 Simulation analysis of multi/single fused fiber

锥形光纤模型是将用于光耦合的 MMF 熔融拉锥至纤芯 $9\ \mu\text{m}$ 左右,借助锥形光纤的滤波特性和低损耗传输特性,将出射的基模光耦合进 SMF 内。使用 Rsoft 软件对锥形光纤建模,并分析其基模传输特性和归一化功率分布,如图 5 所示。当锥形光纤的几何参数满足一定条件时^[20],模场被较好地束缚在纤芯内,从仿真结果来看,传输效率可达到 99%。

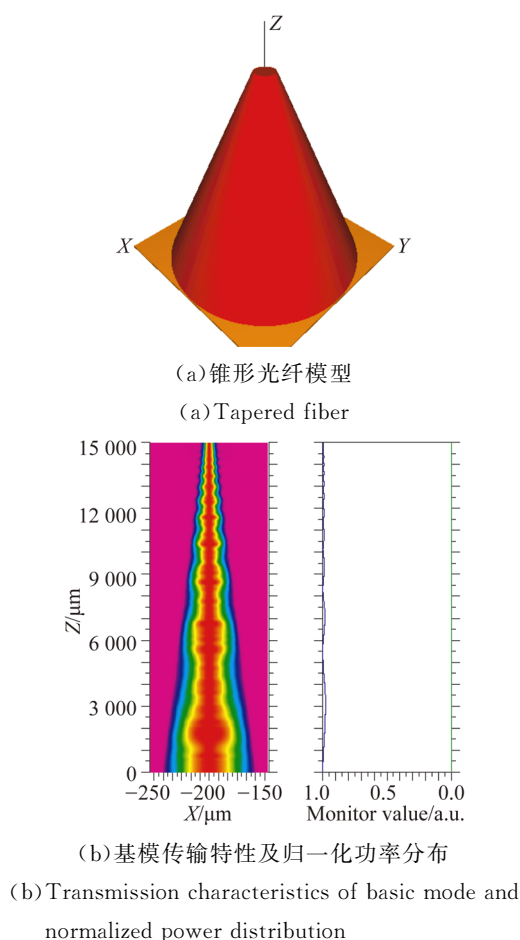


图 5 锥形光纤仿真分析

Fig. 5 Simulation analysis of tapered fiber

3.2 耦合特性与传输特性

测试多/单模熔接模型和锥形光纤模型,用于空间光耦合实验系统。如图 6 所示,信标光发出的 $650\ \text{nm}$ 激光通过显微镜(需考虑数值孔径、等效焦距的设计)聚焦至光纤端面,光纤固定在光纤夹持架上,光纤尾端通过光纤适配器连接光功率计。尾部光纤使用弯曲的方法滤出包层模和辐射模。确定光斑在显微镜焦点附近时,光源更换为 $1\ 550\ \text{nm}$ 通信光,通过调节三维精密调整架

使光功率计中示数达到最大值,该位置为光纤最大耦合效率点。在更高的实验要求下,建议采用五维精密调整架,会得到更好的耦合效果。



图 6 空间光耦合实验系统

Fig. 6 Optical coupling experiment system

实验中,光源为 DFB 可调功率光源,用于输出 $1\ 550\ \text{nm}$ 通信光。显微镜为 OLYMPUS 的 Plan N $10\times$ 型消色差显微物镜,焦距为 $10\ \text{mm}$,数值孔径为 0.3 。三维精密调整架为 THORLABS 的 Nanomax 300,精调步长为 $1\ \mu\text{m}$,行程为 $4\ \text{mm}$ 。多模光纤有两种,芯径分别为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $62.5\ \mu\text{m}$,控制光纤总长为 $35\ \text{cm}$ 左右。实验中,通过熔融拉锥法制备满足“低损”条件的锥形光纤,制备完成后在显微镜下观察并测量其几何尺寸。

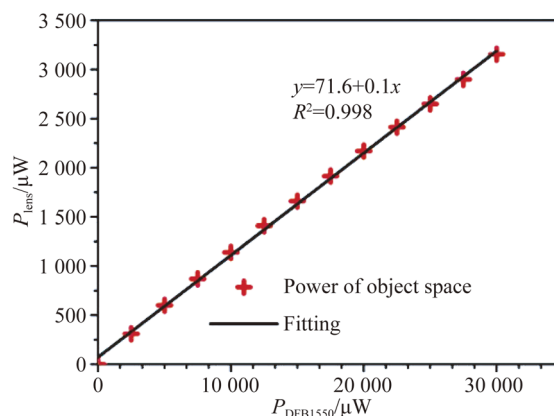


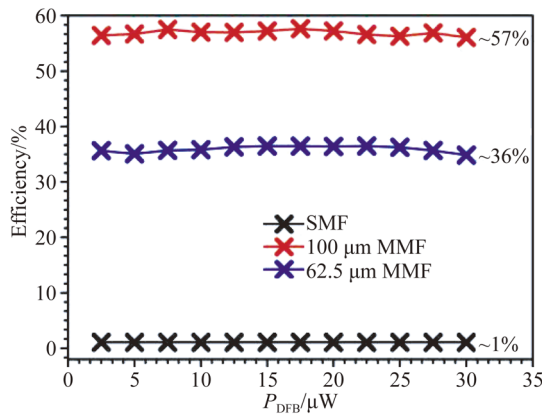
图 7 显微物镜耦合效率实验结果

Fig. 7 Coupling efficiency of microscopic objective

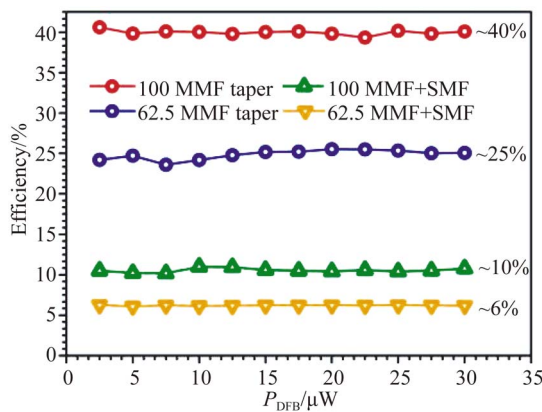
显微物镜的耦合效率可以表示为显微物镜像方空间功率与光源输出功率之比,即 $P_1 = P_{\text{lens}}/P_{\text{DFBI550}}$ 。实验中光源输出功率在 $0 \sim 30\ \text{mW}$ 变化,用光功率计测量透镜像方空间的光功率,实验结果如图 7 所示,图像斜率代表显微物镜的耦合效率, $P_1 = 10\%$ 。该显微物镜耦合效率

较低的原因是本显微物镜对 1 550 nm 激光的透射率较低,通过对显微物镜镀 1 550 nm 高透膜可以提高透镜的耦合效率。但本项工作更关注锥形光纤是否能够提高从 MMF 到 SMF 的传输效率,因此这一点并不影响后面的测试。

图 8(a)为 SMF、62.5 μm 芯径的 MMF 和 100 μm 芯径的 MMF 的空间光耦合实验结果。空间光-光纤的耦合效率定义为: $P_2 = P_{\text{tap input}} / P_{\text{lens}}$,即光纤入射端光功率与显微物镜像方空间光功率之比。由实验结果可以看出,耦合效率具有稳定性,且芯径越大,耦合效率越高,这是因为大芯径光纤的接收光面积更大。



(a) 普通光纤
(a) Common fiber



(b) 两种光纤结构
(b) Multi-mode and tapered fibers

图 8 耦合效率实验结果

Fig. 8 Coupling efficiency of different types of fibers

接下来,将芯径为 62.5 μm 和 100 μm 的 MMF 分别进行熔接 SMF 处理(对应多/单模熔接模型)和熔融拉锥(对应锥形光纤)处理,实验测出其耦合效率如图 8(b)所示,锥形光纤的耦合效

率(40%,25%)明显高于多/单模熔接模型所测的耦合效率(10%,6%)。同时,相比于处理前(图 8(a)),两种 MMF 表现出不同程度的耦合效率下降,未处理前两种 MMF 的耦合效率差为 $\Delta_1 = 20\%$,拉锥处理后为 $\Delta_2 = 15\%$,而多/单模熔接模型差仅为 $\Delta_3 = 4\%$,这是因为处理方法不同,光纤损耗不同,从而光纤传输效率(定义为 $P_3 = P_{\text{tap input}} / P_{\text{fiber output}}$,即光纤入射端功率与光纤出射端功率之比)不同。

图 9 给出了两种光纤结构的传输效率。可以明显看出,锥形光纤的传输效率(70%,68%)远远高于多/单模熔接模型的传输效率(19%,17%),两种处理方法的传输效率不仅对功率变化不敏感,而且对光纤芯径也不敏感。以上证明了锥形光纤低损传输的优良特性。

实验中锥形光纤的传输效率为 70%,低于仿真结果 99%和 Yi Yang 等人^[19]的理论仿真结果 95%,这与锥形光纤制备工艺(锥形光纤母线不为直线、制备过程中对光纤的损伤、端面切割不平)、锥形光纤包层与纤芯不等比例缩小、光纤适配器连接损耗和光功率计测量局限性有关。

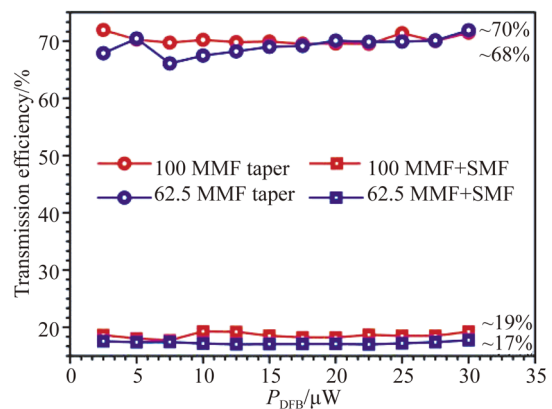
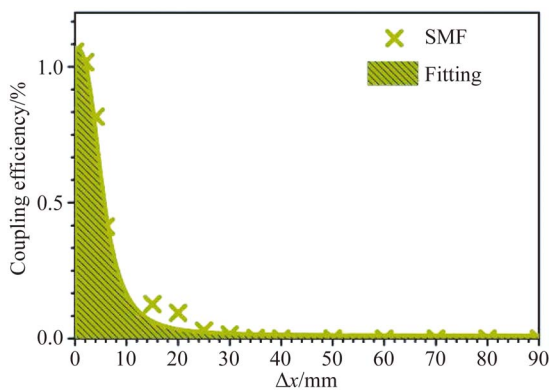


图 9 两种方法传输效率实验结果

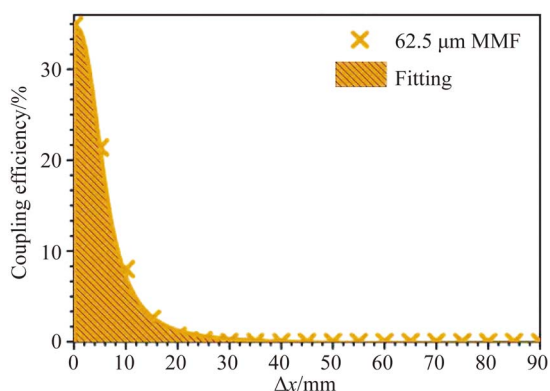
Fig. 9 Transmission efficiency of MMF taper and MMF coupled with SMF

3.3 横向偏移量容差

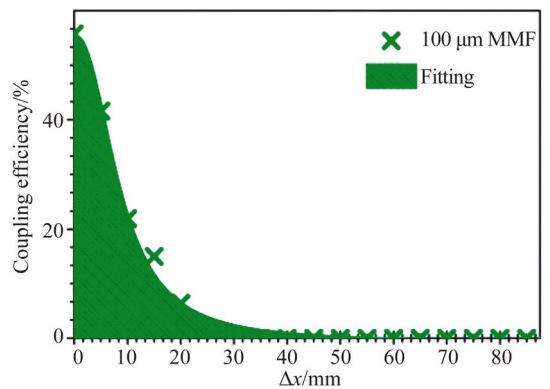
实验中调试达到最佳耦合点后,使用三维精密位移台产生横向偏移,测试了横向偏移量分别对 9 μm 芯径的 SMF(图 10(a))、62.5 μm 芯径的 MMF(图 10(b))以及 100 μm 芯径的 MMF(图 10(c))耦合效率的影响。随着芯径的增大,光纤耦合效率对横向偏离量的容差增大,说明大芯径光纤有利于空间光耦合。



(a) 单模光纤
(a) SMF



(b) 芯径 62.5 μm 的多模光纤
(b) Multi-mode fiber with diameter of 62.5 μm

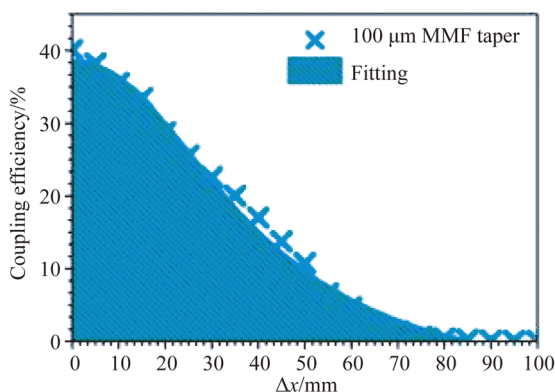


(c) 芯径 100 μm 的多模光纤
(c) Multi-mode fiber with diameter of 100 μm

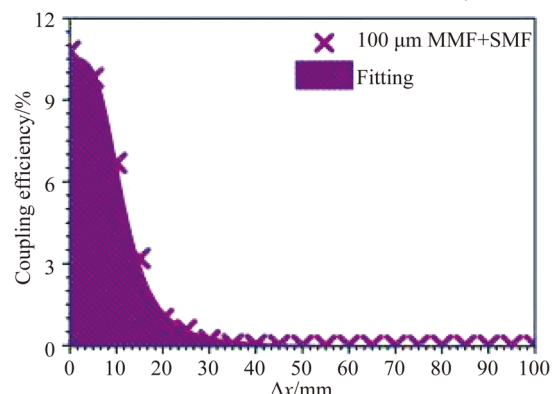
图 10 横向偏移量对普通光纤耦合效率的影响
Fig. 10 Influence of lateral offset on common fiber's coupling efficiency

实验中将两种 MMF(芯径为 100 μm、芯径为 62.5 μm) 分别经过熔融拉锥处理和熔接 SMF 处理。实验结果如图 11 所示,拉锥处理后的锥形光纤(图 11(a)、(c))相比未处理前(图 10(c)、(b)),其耦合效率对横向偏移量容差增大,说明锥形光纤可以增大耦合效率的横向容差,进而增大了接

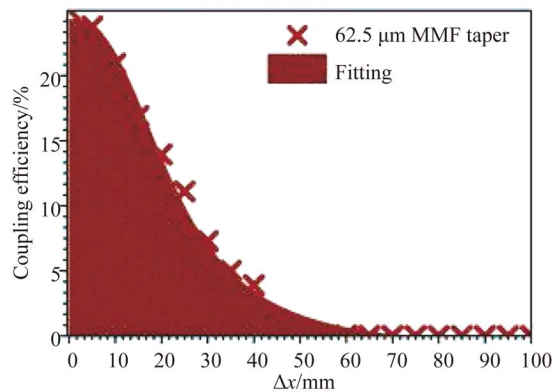
收光的范围,有利于空间光耦合。熔接 SMF 处理后的光纤(图 11(b)、(d))相比未处理前(图 10(c)、(b)),其耦合效率对横向偏移量容差减小,说明多/单模熔接模型使接收光范围减小,不利于空间光耦合。不同芯径光纤拉锥处理时(图 11(a)、(c)),芯径越大,其耦合效率的横向偏移容差越大,同样的结论也适用于多/单模熔接模型(图 11(b)、(d))。



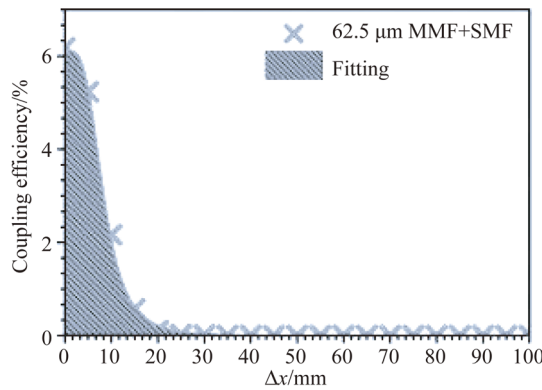
(a) 芯径 100 μm 的锥形光纤
(a) Tapered fiber with diameter of 100 μm



(b) 芯径 100 μm 的多/单模熔接光纤
(b) Multi/single-mode fused fiber with diameter of 100 μm



(c) 芯径 62.5 μm 的锥形光纤
(c) Tapered fiber with diameter of 62.5 μm



(d) 芯径 $62.5 \mu\text{m}$ 的多/单模熔接光纤
(d) Multi/single mode fused fiber with diameter of $62.5 \mu\text{m}$
图 11 横向偏移量的耦合效率影响

Fig. 11 Influence of lateral offset on coupling efficiency of tapered and fused fibers

4 结 论

锥形光纤目前在光纤传感等方面具有广泛应

用, 本文基于仿真结果, 在实验上熔融拉锥法制备了传输效率为 70% 的低损传输锥形光纤, 研究了锥形光纤和双锥形光纤的出射模场, 验证了锥形光纤的滤波特性。接着搭建空间光-光纤耦合系统, 研究了 SMF、 $62.5 \mu\text{m}$ 芯径的 MMF 和 $100 \mu\text{m}$ 芯径的 MMF 的光耦合效率, 说明大芯径光纤更利于光耦合。其次, 研究了多/单模熔接模型和锥形光纤的耦合效率和传输效率, 验证了锥形光纤的低损传输特性。最后, 研究了横向偏移量容差对以上两种光纤结构的空 间光耦合效率的影响, 相比普通光纤, 锥形光纤具有提高横向偏移容差的优点, 这非常有利于光耦合。因此, 在空间光耦合系统中接收端采用锥形光纤, 再结合光学自适应系统, 就可以达到较高且稳定的耦合效率。

参考文献:

- [1] 李少辉, 陈小梅, 倪国强. 高精度卫星激光通信地面验证系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1149-1158.
LI SH H, CHEN X M, NI G Q. Highly precise ground certification system of satellite laser communication [J]. *Opt. Precision Eng*, 2017, 25(5): 1149-1158. (in Chinese)
- [2] 刘伟达, 康一丁, 李小明, 等. 星载激光通信系统遮光罩的优化设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 342-350.
LIU W D, KANG Y D, LI X M, *et al.*. Optimized design of baffle in satellite laser communication system [J]. *Opt. Precision Eng*, 2017, 25(2): 342-350. (in Chinese)
- [3] BRADY A, BERLICH R, LEONHARD N, *et al.*. Experimental validation of phase-only pre-compensation over 494 m free-space propagation [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2679-2682.
- [4] TAN J, ZHAO Z, WANG Y, *et al.*. 12.5 Gb/s multi-channel broadcasting transmission for free-space optical communication based on the optical frequency comb module[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2099-2106.
- [5] 贾建禄, 赵金宇, 王建立, 等. 机动式车载自适应光学波前处理器的设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 48-54.
JIA J L, ZHAO J Y, WANG J L, *et al.*. Design of mobile vehicle-based adaptive optical wavefront processor [J]. *Opt. Precision Eng*, 2018, 26(1): 48-54. (in Chinese)
- [6] BAI SH, WANG J Y, QIANG J, *et al.*. Predictive filtering-based fast reacquisition approach for spaceborne acquisition, tracking, and pointing systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26462-26475.
- [7] 李响. 空间激光通信接收端的光纤高效耦合技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
LI X. *The Efficient Technology of Fiber Coupling Research in the Receiver of Space Laser Communication System* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] WANG J M, ZHOU Y, BAI R M, *et al.*. Point-ahead angle and coalignment error measurement method for free-space optical communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(18): 3886-3893.
- [9] ZHENG D H, LI Y, CHEN ER H, *et al.*. Free-space to few-mode-fiber coupling under atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18739-18744.
- [10] LIU X, XU C, KNOX W H, *et al.*. Soliton self-frequency shift in a tapered air-silica microstructure fiber [J]. *Optics Letter*, 2001, 26(6): 358-360.
- [11] EGGLETON B J, KERBAGE C, WESTBROOK

- P S, *et al.*. Microstructured optical fiber devices [J]. *Optics Express*, 2001, 9(13): 698-713.
- [12] WADSWORTH W J, WITKOWSKA A, LEONSAVAL S G, *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(17): 6541-6549.
- [13] YANG CH K, ZHANG H, LIU B, *et al.*. Electrically tuned whispering gallery modes microresonator based on microstructured optical fibers infiltrated with dual-frequency liquid crystals [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(7): 1333-1340.
- [14] 杨先辉, 张秋华, 于永森, 等. 可调谐 F-P 腔进行锥形光栅反射带宽解调的应力测量方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 651-655.
- YANG X H, ZHANG Q H, YU Y SH, *et al.*. Measurement of temperature-insensitive strain based on reflected bandwidth demodulation of tapered fiber grating [J]. *Opt. Precision Eng*, 2007, 15(5): 651-655. (in Chinese)
- [15] 沈涛, 孙滨超, 冯月. 马赫-曾德尔干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1338-1345.
- SHEN T, SUN B CH, FENG Y. Mach-Zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature [J]. *Opt. Precision Eng*, 2018, 26(6): 1338-1345. (in Chinese)
- [16] 曾永西, 庄其仁. 锥形塑料光纤过渡器的制作及测试[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1535-1541.
- ZENG Y X, ZHUANG Q R. Fabrication and performance analysis of tapered POF connector [J]. *Opt. Precision Eng*, 2009, 17(7): 1535-1541. (in Chinese)
- [17] LOVE J D. Spot size, adiabaticity and diffraction in tapered fibres [J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(19): 993-994.
- [18] YUN G, KAVEHRAD M. Application of optical tapers to receivers in free space/atmospheric optical links [C]. *Military Communication Conference*, 1990(3): 899-903.
- [19] YANG Y, LEE J, REICHARD K, *et al.*. Fabrication and implementation of a multi-to-single mode converter based on a tapered multimode fiber [J]. *Optics Communications*, 2005, 249(1-3): 129-137.
- [20] HU Q, LI C. The spatial light receiver and its coupling characteristics [J]. *Optics Communications*, 2017, 394: 18-22.
- [21] 闫亚东, 何俊华, 许瑞华, 等. 复合式多点测量速度干涉仪光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2023-2028.
- YAN Y D, HE J H, XU R H, *et al.*. Optical system design of compound multi-point measurement velocity interferometer [J]. *Opt. Precision Eng*, 2017, 25(8): 2023-2028. (in Chinese)

作者简介:



闫宝罗(1996—),男,陕西汉中,硕士研究生,2018年于西南交通大学获得学士学位,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: 18328038619@163.com

通讯作者:



刘波(1975—),男,山东青岛人,博士,教授,博导,1998年、2001年、2004年于南开大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光通信、光纤、光纤光栅及微结构光纤特性等的研究。E-mail: liubo@naikai.edu.cn