

新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析

张 银¹ 陈明阳¹ 张永康²

(¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)
(²东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要 通过在多模光子晶体光纤的两端分别连接一根单模光子晶体光纤, 对其选择合适的参数, 形成一种可以实现低弯曲损耗、大模场单模传输的光纤传输系统。运用数值仿真, 分析了该传输系统在模场面积、弯曲损耗、连接损耗等方面的特性。研究表明, 多模光子晶体光纤与单模光子晶体光纤所组成的系统可实现有效的单模传输; 工作波长为 1064 nm 时, 多模光子晶体光纤在直波导状态时的基模模场面积可达 1593 μm^2 ; 在弯曲半径低至 10 cm 时, 多模光子晶体光纤仍然可以保持低损耗传输。经过对多模光子晶体光纤结构参数的优化, 其与单模光子晶体光纤的连接损耗降低至 0.085 dB。

关键词 光纤光学; 大模场光纤; 弯曲损耗; 单模; 数值仿真

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1205001

Investigation of a Novel Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber Transmission System and Its Transmission Characteristics

Zhang Yin¹ Chen Mingyang¹ Zhang Yongkang²

(¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(²School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract A novel optical fiber transmission system for low bending loss, large mode area and single-mode operation is proposed. The system is composed of a multi-mode photonic crystal fiber (PCF) and two single-mode PCFs. The single-mode PCFs are connected to each side of the multi-mode PCF. Numerical simulation on the mode area, the bending loss, the splicing loss and other aspects of the transmission system indicates that the system can effectively suppress the transmission of higher order modes. In addition, at the operating wavelength of 1064 nm, the multi-mode PCF has a large mode area of 1593 μm^2 when it is kept straight, and exhibits a low bending loss even at a small bending radius of 10 cm. The splicing loss between the multi-mode and single-mode PCFs can be as low as 0.085 dB for the optimized PCF configurations.

Key words fiber optics; large-mode-area optical fiber; bending loss; single mode; numerical simulation

OCIS codes 060.2280; 060.2310; 060.2400; 060.4005

1 引言

由于可以有效地降低光纤的非线性效应, 大模场光纤被广泛应用于高功率激光传输、高功率光纤激光器系统中。因为制作工艺和弯曲损耗的限制, 普通光纤一般难以实现大模场的光传输^[1]。

光子晶体光纤(PCF)的出现为大模场光纤的实现提供了一条新的途径。它通过包层内沿轴向规则

排列的微小孔阵列来实现对光的束缚限制, 进一步增大了光纤设计的自由度。与传统的光纤相比, 光子晶体光纤具有无限单模特性、可控色散特性、可实现高双折射和大模场面积传输等优点^[2~4]。因此, 可采用光子晶体光纤来实现大模场面积的单模传输, 能有效地降低光纤激光器高功率运转时的非线性效应和热效应。

收稿日期: 2012-06-15; **收到修改稿日期**: 2012-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(10904051)、江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助课题。

作者简介: 张 银(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: fiona_by@126.com

导师简介: 陈明阳(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光波导、光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: miniyong@163.com(通信联系人)

虽然光子晶体光纤结构在理论上可以实现任意大模场面积的单模传输,但通常会导致纤芯和包层折射率差的降低。在极端情况下,只要光纤产生轻微的弯曲或受到外界的扰动,都将使传导模式产生极大的损耗。因而必须使光纤处于直光纤的状态,避免弯曲和干扰^[5],但这样就失去了一般光纤可以弯曲和移动的灵活性。理想的大模场光纤除了具有所需的大模场面积和单模传输外,还应允许一定程度的弯曲。多年来,人们已经提出了多种基于光子晶体光纤或微结构光纤的大模场光纤。

有研究人员提出了一种基于6个空气孔或低折射率孔环绕纤芯的大模场光纤^[6,7],这种结构利用光纤中的高阶模损耗较高而光纤基模损耗较低的特点,实现等效的单模传输。通过将光纤弯曲的方法可进一步增大光纤基模与高阶模的损耗差。但这种光纤的基模与高阶模的损耗差别较小,其基模损耗一般较大,高阶模损耗又很难提高,因此其应用还存在局限性。Tsuchida等^[8]提出一种两层空气孔环绕纤芯的大模场光纤结构,其基本思想是通过一定参数的设定,将光纤中的高阶模通过谐振耦合到两层空气孔之间的一个环形区域内,从而增大高阶模的损耗,实现等效的单模传输。但是这种光纤中的高阶模只是在一个特定的波长范围内损耗才比较大。

采用多模光纤也可以实现等效的单模传输。Ramachandran等^[9]提出在多模光纤中实现单模传输的新方法,即通过多模光纤的两端各制作一个长周期的光纤光栅,从而将输入的基模转换为某一特定的高阶模,从而实现单模的大模场传输。通过特殊的模式匹配方法,也可以在少模光纤中实现单模传输^[10],这种方法已经获得了实验验证^[11,12]。

本文提出一种实现大模场、低弯曲损耗传输的新型光纤系统。通过多模光子晶体光纤两端连接单模光子晶体光纤的方法,实现等效的单模传输。单模的大模场面积光子晶体光纤的弯曲损耗一般比较大;而多模光子晶体光纤虽然容易实现低弯曲损耗传输,但无法单模传输。将多模光子晶体光纤两端分别和单模光子晶体光纤连接,利用单模光子晶体光纤来滤除高阶模,从而达到使传输系统具有低弯曲损耗和单模传输的目的。

2 数值仿真

大模场光纤系统如图1所示,假设光从单模光纤1输入,从单模光纤2输出。为了使光纤之间连

接方便,三种光纤均为结构相同、参数不同的全固态光子晶体光纤。采用全固态光子晶体光纤的原因是:由于不存在空气孔,光纤可以采用常规的熔接方法进行连接并保持较低的连接损耗。光纤的横截面结构如图2所示,由于光纤的纤芯面积大,因此仅需两层棒环即可保证光纤基模具有低的束缚损耗。这里假设光纤的基质材料均为纯石英,其折射率 $n_c=1.45$ 。其中的棒环均由掺杂的石英组成,它们的折射率为 $n_h=1.444$ 。取掺杂石英棒周期 $\Lambda=50\ \mu\text{m}$ 。其他的结构参数可通过数值模拟确定合适的取值。由光子晶体光纤理论可知,当空气孔的归一化孔直径小于0.42时,光纤可以实现无休止单模传输^[13,14]。对于全固态光子晶体光纤,其归一化孔直径可以增大至0.45^[15]。取单模光子晶体光纤1和单模光子晶体光纤2的归一化孔直径均为 $d/\Lambda=0.4$,假设工作波长 $\lambda=1064\ \text{nm}$ 。



图1 光纤传输系统的结构示意图
Fig. 1 Schematic drawing of the optical fiber transmission system

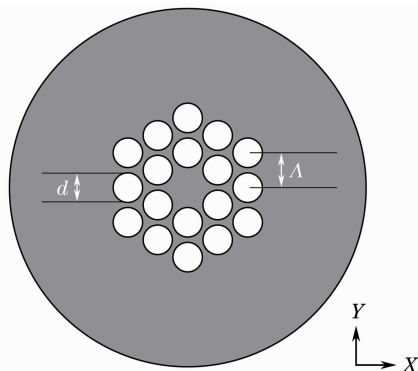


图2 光子晶体光纤的横截面示意图
Fig. 2 Cross section of the PCF

首先采用有限元法分析多模光纤的弯曲损耗情况。光纤沿不同方向弯曲时损耗不同,其中沿X轴方向弯曲时损耗最大,而沿Y轴方向弯曲时损耗最小。将弯曲方向定为沿X轴方向,即光纤弯曲损耗最大的方向。图3给出了不同归一化孔直径的多模光子晶体光纤的弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线。由图可见,当归一化孔直径足够大时,即可实现低弯曲损耗的光传输。当取归一化孔直径 $d/\Lambda=0.85$ 时,由计算结果可得弯曲半径低至0.1 m时,多模光纤仍具有0.0017 dB/m的低弯曲损耗。

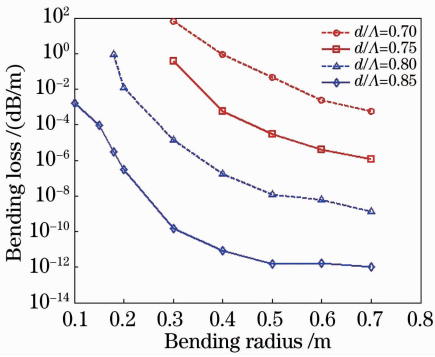


图 3 多模光纤弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线
Fig. 3 Bending loss of the multi-mode PCF versus bending radius

图 4 为单模光纤 ($d/\Lambda = 0.4, \Lambda = 34 \mu\text{m}$) 的弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线。从图中可见,单模光纤在弯曲半径较小时,弯曲损耗很大,只有在 2 m 甚至更大的弯曲半径时,才具有 1 dB/m 以下的弯曲损耗。因此,这种具有大模场面积的单模光纤只有在直光纤形式下才可能正常工作。

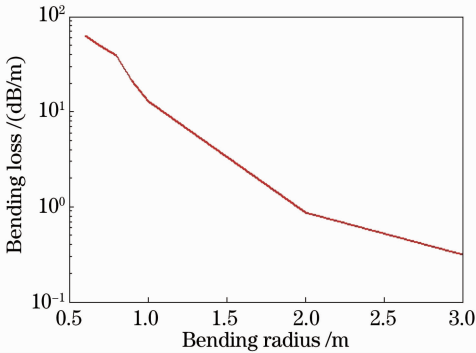


图 4 单模光纤弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线
Fig. 4 Bending loss of the single-mode PCF versus bending radius

图 5 给出不同归一化孔直径下多模光纤的模场面积曲线。由图可见,光纤的模场面积随归一化孔

直径 d/Λ 的增大而减小,但在 $d/\Lambda = 0.85$ 时,光纤的模场面积仍可达到 $1593 \mu\text{m}^2$ 。

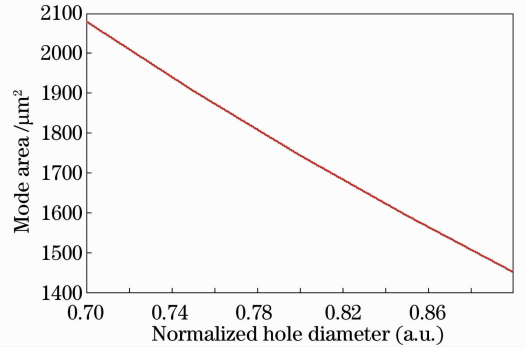


图 5 不同归一化孔直径的多模光纤模场面积的变化曲线
Fig. 5 Mode area of the multi-mode PCF versus normalized hole diameter

其次采用光束传播法分析多模光纤与单模光纤的连接损耗。显然在棒周期相同时,由于多模光子晶体光纤和单模光子晶体光纤的棒直径不同,其纤芯面积是不相同的;另一方面,棒周期相同、棒直径不同时两种光纤的包层等效折射率也不同,这些都会导致两种光纤的连接损耗增大。可通过减小单模光子晶体光纤的棒周期来实现低损耗连接。图 6(a) 给出了光从单模光子晶体光纤进入到多模光纤时的连接损耗曲线。由图可见,其连接损耗均较低,且单模光子晶体光纤的棒周期有一个最优取值。这是因为虽然单模光子晶体光纤纤芯较小时可以使光更容易耦合到多模光子晶体光纤中,但棒周期减小也会导致单模光子晶体光纤的包层等效折射率减小,从而导致单模光子晶体光纤的数值孔径增大,不利于光耦合到多模光子晶体光纤中。由图 6(b) 可见,当光从多模光纤进入到单模光纤时,其连接损耗较大,也存在最佳棒周期。这是因为在取相同的棒周期时,单模光纤的数值孔径小于多模光纤,因而两者连

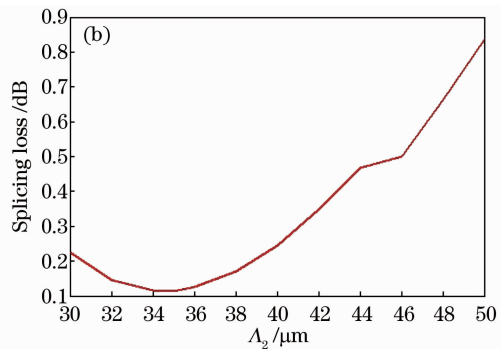
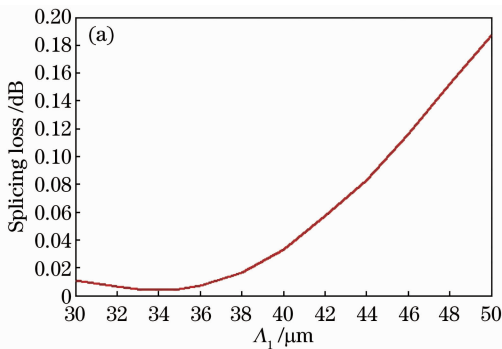


图 6 (a)单模光纤 1 和(b)单模光纤 2 与多模光纤的基模连接损耗随介质柱周期的变化曲线
Fig. 6 Splicing loss of the fundamental mode versus rods period (a) between the input single-mode PCF and the multi-mode PCF and (b) between the multi-mode PCF and the output single-mode PCF

接损耗较大。当单模光纤取较小的棒周期时,由于光纤的包层等效折射率随棒周期的减小而减小,因而增大了光纤的数值孔径,增强了光纤的集光能力。单模光纤的棒周期并非越小越好,因为这样会导致单模光纤的纤芯面积过小,从而使其与多模光纤的连接损耗增大。在单向光传输系统中,为了保证光纤的基模之间具有较低的连接损耗,取单模光纤 1 和单模光纤 2 的棒周期 Λ_1 和 Λ_2 分别为 $34 \mu\text{m}$ 和 $35 \mu\text{m}$ 。由图 6 可得单模光纤 1 与多模光纤的连接损耗为 0.004 dB ,而多模光纤与单模光纤 2 的连接损耗为 0.114 dB 。

由于采用了大归一化直径的掺杂石英棒,多模光纤存在高阶模即 LP_{11} 模,下面分析这种光纤系统对 LP_{11} 模的抑制能力。由于多模光纤的基模与高阶模具有正交性,而单模光子晶体光纤中的基模模场与多模光子晶体光纤的基模相似,因而单模光纤的基模可以高效地转化为多模光纤的基模,同时在

连接处单模光纤的基模与多模光纤的高阶模不容易发生耦合。图 7(a)为单模光纤 1 与多模光纤连接处,多模光纤中高阶模的连接损耗随横向偏移的变化曲线。单模光纤 1 中基模进入多模光纤时,由于单模光纤 1 与多模光纤连接处产生横向偏移,基模中的少量能量会转化为多模光纤中的高阶模。从图中可以看出,当偏移量较小时,多模光纤中高阶模的连接损耗很大,即单模光纤中的基模与多模光纤中的高阶模的耦合被有效抑制;当偏移量较大时,高阶模的连接损耗较小,则单模光纤 1 中基模进入多模光纤后,其部分能量将转化为多模光纤中的高阶模。图 7(b)为多模光纤与单模光纤 2 连接处,多模光纤中高阶模的连接损耗随横向偏移的变化曲线,其结果与图 7(a)类似。在偏移量小于 $3 \mu\text{m}$ 时,两种情况下的连接损耗均大于 17 dB 。因此,高阶模可被很好地抑制,从而使整个光纤系统保持单模传输。

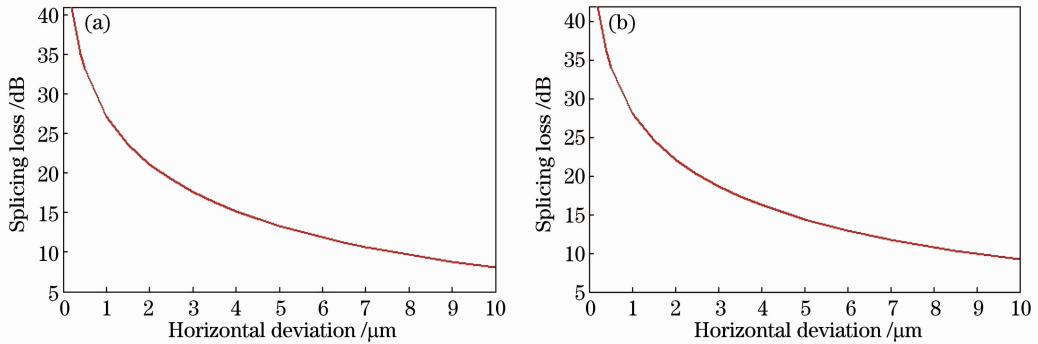


图 7 (a)单模光纤 1 和(b)单模光纤 2 与多模光纤连接处的高阶模连接损耗随横向偏移的变化曲线

Fig. 7 Splicing loss of the higher order mode (HOM) in the multi-mode PCF versus horizontal deviation for (a) light transmission from the input single-mode PCF to the multi-mode PCF, and (b) light transmission from the multi-mode PCF to the output single-mode PCF

3 优化设计

由上述分析可知,由于归一化孔直径不同,使两种光纤的连接损耗较大。由光子晶体光纤理论,光纤的模式基本特性主要由其内层掺杂石英棒的参数决定,而外层掺杂石英棒主要起降低模式束缚损耗的作用^[16]。因此,可以对多模光纤的结构参数进行调整以降低光纤的连接损耗。

将多模光纤的内层掺杂石英棒尺寸减小,而将外层掺杂石英棒尺寸增大,如图 8 所示,即减小内层棒直径以减小其与单模光纤在数值孔径以及模场面积上的差别,而增大外层棒直径以减小其弯曲损耗。

图 9 给出了优化后的多模光纤与单模光纤的连接损耗曲线。可见,单模光纤 1 与多模光纤的连接

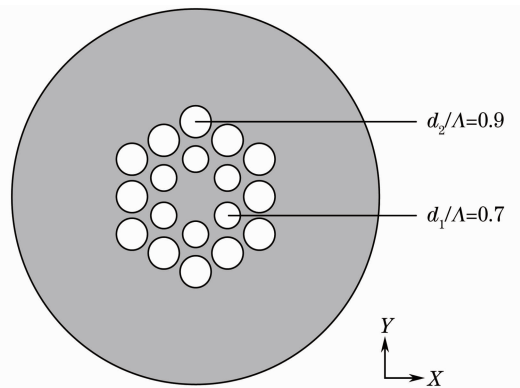


图 8 优化后的多模光纤的横截面示意图

Fig. 8 Cross section of the optimized multi-mode PCF configuration

损耗可低至 0.002 dB 以下,而多模光纤与单模光纤 2 的连接损耗也可以低至 0.085 dB。这说明优化后的多模光纤结构有利于降低光纤之间的连接损耗。若将这种光纤系统用作双向传输,可以取单模光纤

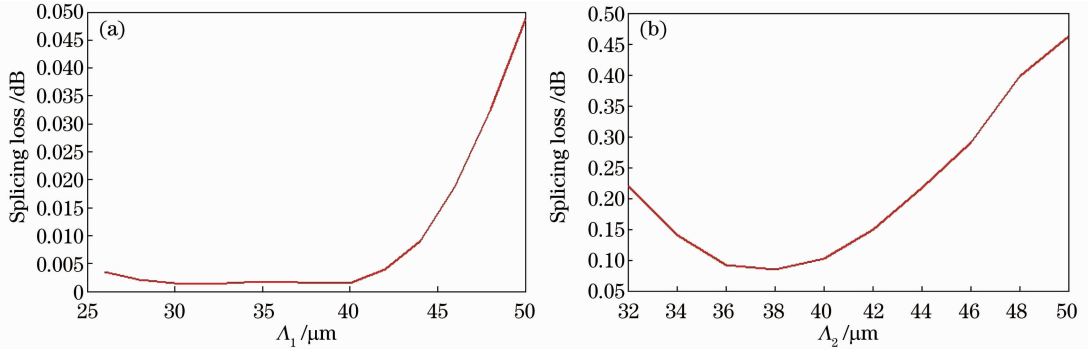


图 9 优化后(a)单模光纤 1 和(b)单模光纤 2 与多模光纤的基模连接损耗随介质柱周期的变化曲线

Fig. 9 Optimized splicing loss of the fundamental mode versus rods period (a) between the input single-mode PCF and the multi-mode PCF and (b) between the multi-mode PCF and the output single-mode PCF

图 10 为优化后多模光纤的弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线,从图中可以看出优化后的多模光纤仍然能够保持低弯曲损耗传输。当弯曲半径为 0.2 m 时,其弯曲损耗为 1.2×10^{-4} dB/m,高于优化前的结果,但仍能保证低损耗的光传输。内层棒直径减小后,多模光纤的模场面积相比于结构优化前增加至 $2077 \mu\text{m}^2$ 。

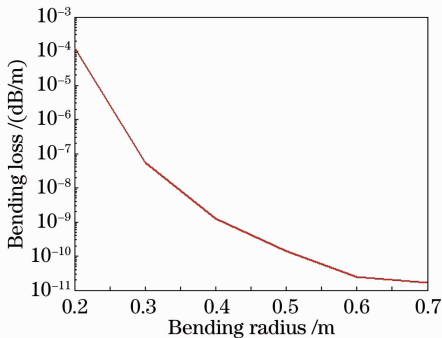


图 10 优化后的多模光纤的弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线

Fig. 10 Bending loss of the optimized multi-mode PCF versus bending radius

4 结 论

提出采用单模光子晶体光纤与多模光子晶体光纤匹配连接的方法实现等效的单模传输,利用多模光子晶体光纤的包层与纤芯之间的高折射率差,实现低弯曲损耗的光传输。通过优化光纤的参数,在保证低弯曲损耗传输的条件下,降低了光纤间的连接损耗,并增大了光纤的模场面积。这种新型光纤系统既在一定程度上克服了普通大模场光纤弯曲损

的棒周期为 $38 \mu\text{m}$ 。当光沿正向传输,即光从单模光纤进入多模光纤时的连接损耗为 0.0014 dB,而光沿反向传输,即光从多模光纤进入单模光纤时的连接损耗为 0.085 dB。

耗大的缺点,增加了光纤应用的灵活性,又有效控制了多模大模场光纤中高阶模对光传输特性的影响。若以多模光纤为增益介质,该系统还有望组成紧凑型单模输出高功率光纤激光器系统。

参 考 文 献

- 1 M. J. Li, X. Chen, A. Liu *et al.*. Limit of effective area for single-mode operation in step-index large mode area laser fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3010~3016
- 2 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
余重秀,苑金辉,申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900139
- 3 Yi Changshen, Zhang Peiqing, Dai Shixun *et al.*. Research progress of large-mode area photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 100001
易昌申,张培晴,戴世勋等. 大模场光子晶体光纤研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(10): 100001
- 4 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on the extreme characteristics of dispersion of photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806001
关寿华,于清旭,郑建洲. 光子晶体光纤色散极值特性的研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0806001
- 5 J. Limpert, N. Deguil-Robin, I. Manek-Höninger *et al.*. High-power rod-type photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1055~1058
- 6 W. S. Wong, X. Peng, J. M. McLaughlin *et al.*. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2855~2857
- 7 L. Dong, T. W. Wu, H. A. McKay *et al.*. All-glass large-core leakage channel fibers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 47~53
- 8 Y. Tsuchida, K. Saitoh, M. Koshiba. Design of single-moded holey fibers with large-mode-area and low bending losses: the significance of the ring-core region [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1794~1803
- 9 S. Ramachandran, J. W. Nicholson, S. Ghalmi *et al.*. Light

- propagation with ultralarge modal areas in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1797~1799
- 10 M. Y. Chen, Y. R. Li, Y. Zhang *et al.*. Design of dual-mode optical fibres for the FTTH applications[J]. *J. Opt.*, 2011, **13**(1): 015402
- 11 F. Yaman, N. Bai, B. Zhu *et al.*. Long distance transmission in few-mode fibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18** (12): 13250~13257
- 12 F. Yaman, N. Bai, Y. K. Huang *et al.*. 10× 112 Gb/s PDM-QPSK transmission over 5032 km in few-mode fibers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 21342~21349
- 13 G. Renversez, F. Bordas, B. T. Kuhlmeiy. Second mode transition in microstructured optical fibers; determination of the critical geometrical parameter and study of the matrix refractive index and effects of cladding size[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1264~1266
- 14 N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen *et al.*. Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1879~1881
- 15 M. Y. Chen. All-solid silica-based photonic crystal fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(1): 151~158
- 16 M. Y. Chen, R. J. Yu, A. P. Zhao. Confinement losses and optimization in rectangular-lattice photonic-crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(9): 2707~2712

栏目编辑:王晓琰