

基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体 光纤低损耗熔接

杨 清 施解龙 孙伟胜 黄图斌

(上海大学理学院物理系, 上海 200444)

摘要 光子晶体光纤(PCF)与普通单模光纤(SMF)的低损耗熔接技术是光子晶体光纤走向实用化必须解决的关键技术问题。提出一种基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体光纤低损耗熔接的新方法,利用熔融拉锥机对模场不匹配的两类 PCF 进行预处理,结合常规电弧放电熔接技术对三种不同类型的 PCF 与 SMF 的熔接损耗进行实验研究。在实验中通过精确控制熔融拉锥机各种参数,实现了不同模场直径 PCF 和 SMF 的模场匹配,该方案同时通过优化各种电弧放电参数,使熔接后的损耗降到了 0.3 dB 以下,实现了 PCF-SMF 之间低损耗、高强度的熔接,满足了不同模场 PCF 实际应用的要求,具有很好的潜在应用价值。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;熔接损耗;电弧放电;单模光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1006001

Low-Loss Splicing Based on the Technique of Mode-Field Matching by Fusion Taper Rig

Yang Qing Shi Jielong Sun Weisheng Huang Tubin

(Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract The low-loss splicing technique between photonic crystal fibers (PCF) and normal single-mode fibers (SMF) is a critical problem that should be solved before the application of PCF. A new method to realize low loss splicing based on the new technique of mode field matching by fusion taper rig is proposed. The preprocessing that changes the mode-field diameter (MFD) is first done by fusion taper rig. Using traditional arc-fusion method combined with fusion taper rig, the experimental study on splicing loss between different PCF and SMF is performed. During the experiment, mode field matching between different PCF and SMF is observed by changing fusion taper rig's parameters. The splicing loss can drop to below 0.3 dB by optimizing the discharge parameters, and then satisfy the application requirement. In return, the optimal sets of fusion splice parameters are determined and low-loss, high-strength splicing between the PCF and SMF is achieved. This method can provide the reference for other similar splicing between PCF and SMF.

Key words fiber optics; photonic crystal fibers (PCF); splicing loss; arc discharge; single-mode fibers (SMF)

OCIS codes 060.2310; 060.4510; 060.2360; 060.5295; 060.24301

1 引 言

近年来,光子晶体光纤(PCF)^[1]因其独特的微结构及其色散、非线性等多种特性^[2],正经历着飞速的发展。PCF 的横截面上有较复杂的折射率分布,

通常含有不同排列形式的气孔,这些气孔的尺度与光波波长大致在同一量级且贯穿器件的整个长度,光波可以被限制在光纤芯区传播。PCF 有很多奇特的性质如:可以在很宽的带宽范围内只支持一个

收稿日期: 2012-04-06; **收到修改稿日期**: 2012-05-08

基金项目: 上海市重点学科建设项目(S30105)资助课题。

作者简介: 杨 清(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: yangqing5@shu.edu.cn

导师简介: 施解龙(1960—),男,博士,副教授,主要从事光纤光栅、光通信器件等方面的研究。

E-mail: sjlong@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

模式传输^[3];包层区气孔的排列方式能够极大地影响模式性质;排列不对称的气孔使其也可以产生很大的双折射效应等。

随着 PCF 应用的不断推广,近来人们对于小芯径和大模场 PCF 也产生了广泛的兴趣,如气体和液体传感器^[4]、表面等离子体共振传感器^[5]和高非线性应用^[6]等。然而,现实中大量的光学设备,如激光光源、光学检测器件和光学开关^[7]等都采用传统单模光纤(SMF)作为连接,考虑到这种特殊应用和传统光学设备相结合时,PCF 和 SMF 的低损耗熔接显得非常必要。如何降低耦合损耗、寻求最佳耦合方案已成为当务之急。自 1999 年 Bennett 等^[8]第一次成功报告了 PCF 和 SMF 熔接以来,出现了各种熔接方式,例如电弧多次放电熔接法^[9,10]、CO₂ 激光熔接法^[11]、梯度折射率光纤透镜熔接法^[12]以及采用过渡光纤^[13]等。这些方法都有一些不足,如采用电

弧多次放电技术,虽然可以控制 PCF 空气孔的塌缩,但是不能精确地控制空气孔的塌缩长度和塌缩程度,这样导致获得的最低熔接损耗仍然较大;其他一些方法存在成本过高、系统复杂、或光纤结构受限等缺点。基于这些原因,提出基于光纤拉锥模场匹配技术的 PCF 低损耗熔接的新方法,这种方法不但限制光纤尺寸,即可以同时缓解小芯径和大模场 PCF 与 SMF 的模场失配问题;同时还能精确控制空气孔的塌缩长度和塌缩程度,这为不同模场 PCF 的器件制作提供了有价值的参考。

2 PCF 和 SMF 的熔接

2.1 光纤参数

表 1 描绘了本实验用到的三种不同 PCF 的具体参数。这三种不同 PCF 分别标注为 PCF1、PCF2、PCF3,其相应的横截面如图 1 所示。

表 1 PCF 参数,包含 1550 nm 波段的模场直径

Table 1 PCF parameters, including mode field diameters (MFD) at 1550 nm

Fiber	Cladding / μm	Hole diameter / μm	Hole pitch / μm	MFD / μm
PCF1 [Fig. 1(a)]	125	5.23	8.10	10.40
PCF2 [Fig. 1(b)]	125	2.56	4.13	3.59
PCF3 [Fig. 1(c)]	125	2.11	3.58	14.53

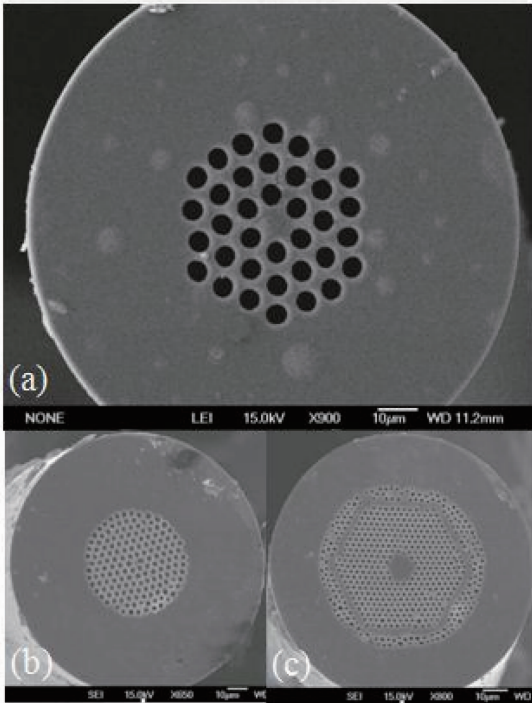


图 1 PCF 的扫描电子显微镜图像

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) images of the investigated PCF cross sections

根据传统光纤的理论,光纤之间的连接损耗受模场匹配、横向偏移、轴向倾斜等因素的影响^[14],当用常规电弧放电去熔接 PCF 和其他光纤的时候,这个熔接损耗可以表达为

$$\alpha_c = -10 \lg \left[\left(\frac{2\omega_{\text{PCF}}\omega_{\text{SMF}}}{\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2} \right)^2 \exp\left(\frac{-2u^2}{\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2}\right) \times \exp\left(\frac{-k_0^2 n_{\text{SiO}_2}^2 \theta^2 \omega_{\text{SMF}}^2 \omega_{\text{PCF}}^2}{\omega_{\text{SMF}}^2 + \omega_{\text{PCF}}^2}\right) \right], \quad (1)$$

式中 ω_{PCF} 和 ω_{SMF} 分别代表 PCF 和 SMF 的模场直径, u 为横向偏移量, θ 为轴向的倾斜角度, k_0 为自由空间的波数, n_{SiO_2} 为二氧化硅的折射率。

2.2 PCF 的预处理

在实验中,PCF2 和 PCF3 在 1550nm 波段的模场直径分别为 3.59 μm 和 14.53 μm 。根据(1)式,当忽略横向偏移、轴向倾斜等因素时,其理论损耗是 4.2 dB 和 0.5 dB,这也是非常大的,因为 PCF 和 SMF 的模场明显不匹配,要想低损耗的熔接它们是非常困难的。为了让它们实现与 SMF 的模场匹配,接下来利用熔融拉锥机来改变 PCF2 和 PCF3 的模场直径。

2.2.1 PCF2 模场直径的扩大方法

基于精确控制空气孔塌陷来扩大 PCF2 模场直径的原理如图 2(b)所示。实验中通过控制氢气流量和火焰来回扫描的速度可以控制加热区的温度，从而实现 PCF 空气孔的精确塌缩。

在对 PCF 空气孔实现塌缩操作过程中，由于光纤波导结构的改变将会引入额外的损耗。但是只要控制好空气孔塌缩区域的结构，让其满足波导的渐

变条件^[15]。这种形变在光纤中引起的损耗就可以忽略。在实验中我们通过设置拉锥速度为 0，起始扫距为 15 mm，最终扫距为 10 mm，每次增量为 0.2 mm，扫描速度为 3 mm/s 等熔融拉锥参数来实现这种渐变的扫描。火焰扫描路径如图 2(b)所示，在实验中，火焰移动的距离会渐渐减小，最后得到大约 5 mm 的渐变区域，实验结束后，在渐变的区域切开，最终获得两个锥形部分，如图 3(c)所示。

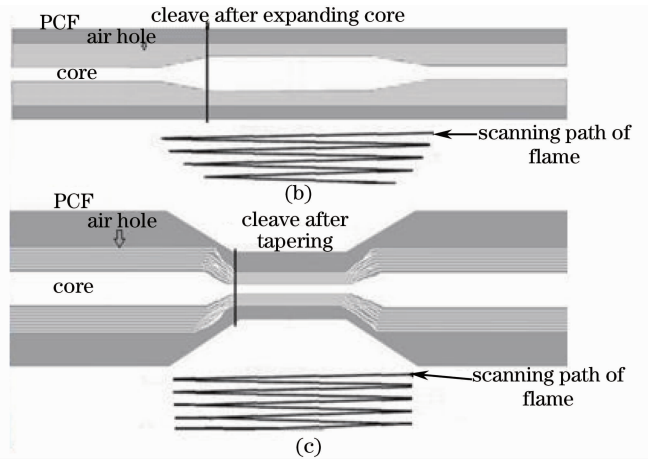


图 2 (a)实验室所用的熔融拉锥机；(b)小模场直径 PCF2 实验效果图；(c)大模场直径 PCF3 实验效果图
Fig. 2 (a) Picture of fusion taper rig; (b) schematic longitudinal cross section of PCF2; (c) schematic longitudinal cross section of PCF3

2.2.2 PCF3 模场直径的减小方法

因为 PCF3 的模场直径(14.53 μm)比普通单模光纤大很多，直接熔接会引入大的损耗。为了使它们熔接损耗降低，就必须减小 PCF3 的模场直径。使得熔融拉锥机的火焰对 PCF3 的一小部分进行加热。这个火焰沿着光纤以 3 mm/s 的速度扫描，同时设置起始扫距和最终扫距都为 15 mm，火焰扫描路径如图 2(c)所示，但此时要设置拉锥速度，设置拉锥速度为 50 $\mu\text{m}/\text{s}$ ，最后在处理后的光纤的锥面切开，获得两个锥形部分，如图 3(d)所示，这使得每一端都有相对较小的模场直径。锥变的 PCF3 的纵向结构如图 2(c)所示。由于预处理过的 PCF2 和 PCF3 的空气孔直径分别为 1.22、0.89 μm ；孔间距分别为 4.13、1.31 μm 。通过多极法近似计算得到的模场直径和普通单模模场直径非常接近，使得熔接损耗大幅度减小。

2.3 实验方法

实验所用到的设备有熔融拉锥机、古河 S177 光纤熔接机、光纤切割刀、激光光源以及用于检测光强的光功率计。在实验中光纤切面用光纤切割刀切割，从而可将熔接时因端面不平整造成的损失降至最低，而由于熔接机无法判别出 PCF 的纤芯，所以

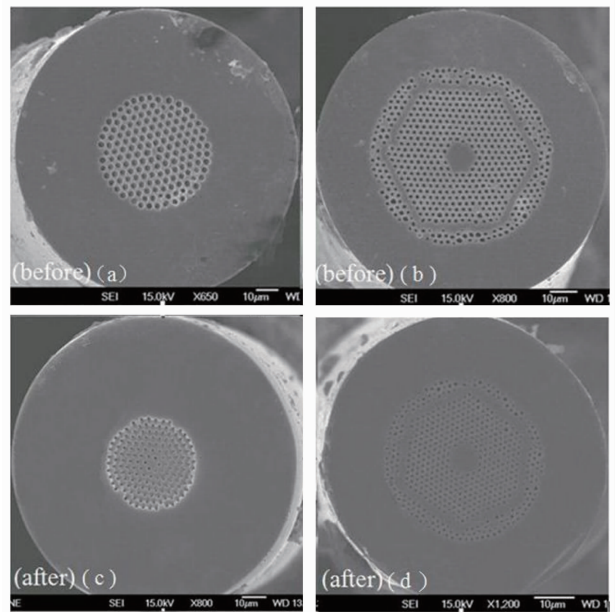


图 3 PCF2 和 PCF3 熔融拉锥前后扫描电子显微镜图片
Fig. 3 SEM images of the PCF2, PCF3 before and after fusion tapering
在熔接中舍弃了自动熔接模式，而改用手动熔接模式。

实验中所用的测试平台，如图 4 所示。首先在

两段跳线中间熔接一段 SMF,将一根跳线接到激光器上,另一根跳线接到 1550 nm 档的光功率计 (OPM)上[如图 4(a)所示],记录下现在的光功率值,然后将 SMF 从中间断开,切好端面[如图 4(b)所示],通过设定熔接参数,在中间熔接一根一定长度的 PCF[如图 4(c)所示],熔接时先将接头 C 处的 PCF 光纤切好端面,和 SMF 一起放到熔接机中,调整熔接机使得两光纤基本对准;再用同样型号的另

一台熔接机也设置好相同的熔接参数,在 D 点将切好端面的两光纤放置好并初步对准,然后观察着光功率计显示值进一步精确对准,此过程熔接机一直处于手动模式,观察两接头的双侧光纤都对准时功率计显示的值,调节两侧光纤使得这一显示值最大。此过程是让熔接时尽量减少横向偏移、轴向倾斜等因素带来的损耗影响。当光功率计读数达到最佳时开始熔接光纤。

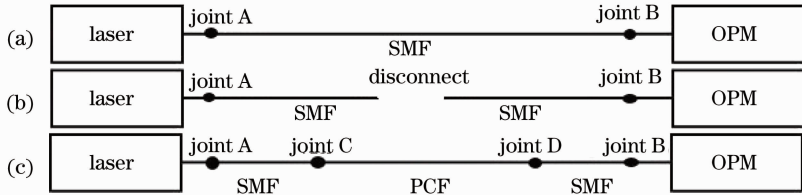


图 4 PCF 与 SMF 熔接测试过程示意图。(a) A 和 B 接头之间接 SMF; (b) 将 SMF 从中间截断; (c) 在 C 和 D 接头之间接 PCF

Fig. 4 Sketch map of the procedure of splicing between PCF and SMF. (a) Splicing SMF between A and B; (b) cutting the SMF in the middle; (c) splicing PCF between C and D

2.4 实验注意事项

熔接过程中需要注意一些问题:

1) 要设置熔接清洁放电强度和ación,并且在清洁放电时让 PCF 和 SMF 两端适当远离,以便在蒸发掉 PCF 中残留酒精的同时保护 PCF 微结构不被破坏,这一过程是为了防止在熔接过程中出现气泡从而减小额外损耗。

2) 由于两种光纤的结构不同导致其热特性不同,PCF 由于其特殊的空气孔包层结构使得它更容易被高温熔化,因此在熔接过程中将其偏移熔接机的中心位置放置,以便保证 SMF 所在位置的电弧熔接放电能量略高于 PCF 所在位置的能量,从而降低 PCF 微结构的破坏程度。

3) 由于在熔接瞬间,两光纤有一个推挤过程,如果两光纤靠的太紧,熔接处将发生形变,如果离的过远将无法熔接上,因此熔接前,应该调整好两光纤位置的间距,让它们有一个合适的推进距离。

3 实验结果与分析

本课题组通过改变光纤熔接机中放电强度和放电时间来研究各种 PCF 和 SMF 的熔接损耗。

从图 5 中可以看出,对于固定不同的放电时间,通过改变放电强度,每一条曲线的趋势基本相同。当光纤熔接放电强度小的时候,由于放电能量还不能使得两种不同光纤很好的熔接,所以损耗偏大,因此当放电强度增大的时候,损耗变小;但当放电强度

超过一定值的时候,如果它继续增大,过大的能量会使得 PCF 的空气孔爆破,从而导致光纤熔接损耗急剧增大。将这种联系转换为另一种表达关系如图 6 所示。基于此结果,找出最适合 PCF1 和 SMF 的熔接参数,当熔接强度为 145,熔接放电时间为 400 ms 的时候,其最小的熔接损耗约为 0.22 dB。图 7 为 PCF1 成功熔接上标准单模光纤至于高倍光学显微镜下的照相图。从图 5 中取了两个样品点来观察,从图 7 中可以看出取样点(a),空气孔出现了明显的爆破,从而加大了 PCF1 和单模光纤的熔接损耗,而取样点(b),光纤熔接完好,光纤损耗可降低至 0.22 dB。

运用相同的方法对预处理过的 PCF2、PCF3 和 SMF 也进行了熔接,基于反复实验,最终熔接效果如图 8 所示。图 8(a)为 PCF2 和 SMF 的熔接图,当

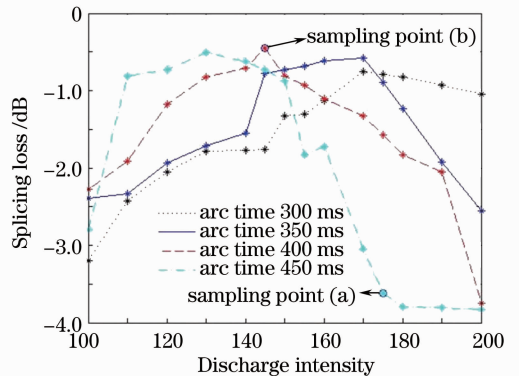


图 5 不同熔接放电时间下的熔接损耗图
Fig. 5 Splicing loss with different discharge times

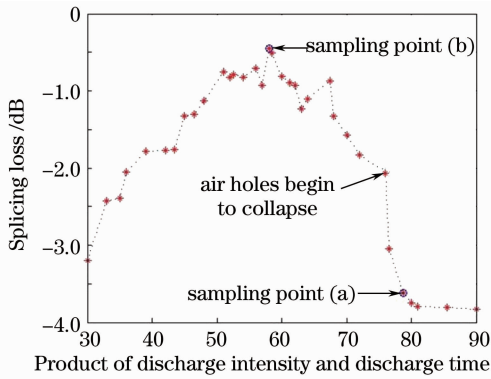


图 6 放电强度与放电时间的乘积对于光子晶体光纤与标准单模光纤熔接损失的影响

Fig. 6 Effect of the product (discharge intensity and discharge time) on welding losses between PCF1 and standard SMF

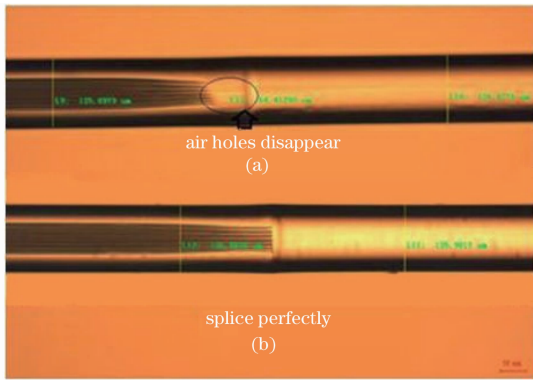


图 7 左端为 PCF1,右端为单模光纤。(a)图 64.4129 μm 空气孔塌陷; (b) 熔接完好

Fig. 7 Left of the photograph is PCF1 and right of the photograph is standard SMF. (a) Air-hole collapse at 64.4129 μm ; (b) splicing perfectly

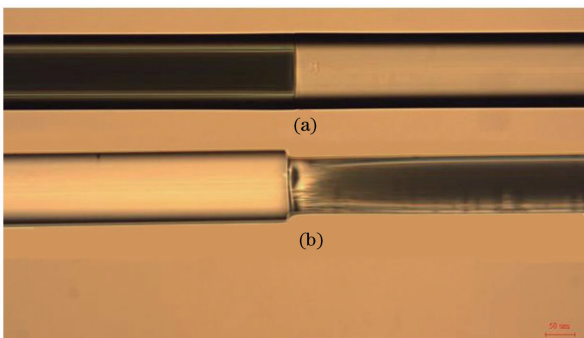


图 8 (a) PCF2 和普通单模光纤熔接图; (b) PCF3 和普通单模光纤熔接图

Fig. 8 (a) Splicing photograph between PCF2 and SMF; (b) splicing photograph between PCF3 and SMF

扩大模场直径后最低损耗可以控制在 0.3 dB 以下; 图 8(b)为 PCF3 和 SMF 的熔接图,由于拉锥效果,包层直径也有了相应地减小,当减小模场直径后最

低损耗可以控制在 0.25 dB 以下。

4 结 论

PCF 的进一步发展及其实用化进程的推进,要求尽快解决 PCF 与传统光纤以及各种设备、器件的接续问题。基于光纤拉锥模场匹配技术的方法实现了不同模场 PCF 和 SMF 的低损耗熔接。通过对 PCF2 空气孔的精确塌陷来扩大 PCF2 的模场直径,但对 PCF2 的包层直径没有影响。通过熔融拉锥,PCF3 的模场直径和包层直径都有了相应地减小。通过改变熔接时间、熔接强度等参量,实现了不同模场直径的 PCF 和 SMF 的低损耗熔接,最后使得熔接损耗都降到了 0.3 dB 以下。这一方案大大提高了熔接效率和熔接质量,满足了不同模场 PCF 实际应用的要求。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*, All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
- 3 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
- 4 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 5 J. M. Fini. Microstructured fibres for optical sensing in gases and liquids [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(6): 1120~1128
- 6 P. J. A. Sazio, A. Amezcua-Correa, C. E. Finlayson *et al.*. Microstructured optical fibres as high-pressure microfluidic reactors [J]. *Science*, 2006, **311**(5767): 1583~1586
- 7 J. C. Knight, D. V. Skryabin. Nonlinear waveguide optics and photonic crystal fibres [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15365~15376
- 8 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on all optical switch based on photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1650~1653
- 9 杨广强, 张 霞, 任晓敏 等. 基于光子晶体光纤的全光开关实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1650~1653
- 10 P. J. Bennett, T. M. Monro, D. J. Richardson. Toward practical holey fiber technology: fabrication, splicing, modeling, and characterization [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(17): 1203~1205
- 11 L. Xiao, W. Jin, M. S. Demokan. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(2): 115~117
- 12 Guo Tieying, Lou Shuqin, Li Honglei *et al.*. Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 511~516
- 13 郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷 等. 光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方案[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 511~516
- 14 J. H. Chong, M. K. Rao, Y. Zhu *et al.*. An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO₂ laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 942~944
- 15 A. D. Yablou, R. T. Bise. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splices using GRIN fiber lenses [J].

- IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 118~120
- 13 Zhang Wei, Zhang Lei, Chen Shi *et al.*. Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1389~1392
张 巍, 张 磊, 陈 实 等. 高非线性光子晶体光纤与普通光纤低损耗熔接实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1389~1392
- 14 Fang Hong, Lou Shuqin, Ren Guobin *et al.*. Theoretical analysis on splice loss of photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 806~811
方 宏, 娄淑琴, 任国斌 等. 光子晶体光纤接续损耗的理论分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 806~811
- 15 G. E. Town, J. T. Lizier. Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1042~1044

栏目编辑: 王晓球