

光子晶体光纤的后处理技术

陈子伦 侯 静 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对光子晶体光纤的后处理技术进行了详细的分析和讨论, 包括拉锥、空气孔膨胀后拉锥、选择性空气孔塌缩。利用这些后处理技术, 可以改变光子晶体光纤的结构参数, 如空气孔大小、纤芯大小和形状等, 制作各种不同类型的光子晶体光纤光器件。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 后处理技术; 拉锥; 膨胀后拉锥; 选择性空气孔塌缩

中图分类号 TN253 OCIS 060.5295 060.2280 文献标识码 A

Rost-Processing Techniques of Photonics Crystal Fibers

Chen Zilun Hou Jing Jiang Zongfu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Post-processing techniques of photonic crystal fibers (PCFs) are discussed and analyzed in detail, including taper, taper after inflation, controlled hole collapse. Using these techniques, the configuration parameters of the PCFs can be easily changed, such as hole size, core diameter, core shape and so on. Many types of PCFs devices can be made by using these techniques.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; post-processing technique; taper; taper after inflation; controlled hole collapse

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)具有许多传统光纤无法比拟的奇异特性^[1,2], 其后处理技术是实现光子晶体光纤潜在应用价值的重要手段^[3-5], 其中光子晶体光纤熔融拉锥机是后处理技术中最常用的工具。普通光纤的拉锥只是把光纤的直径变小, 然而对于光子晶体光纤的拉锥, 由于光子晶体光纤加热空气孔受到表面张力影响, 空气孔直径相对于整个光纤外径也将会发生变化, 从而增加了光子晶体光纤的拉锥难度, 但利用光子晶体光纤空气孔的变化也将增加一些光子晶体光纤的特殊应用。

目前光子晶体光纤的后处理技术主要包括拉锥技术^[6,7]、膨胀后拉锥技术^[8,9]、选择性空气孔塌缩技术^[10]等。在光子晶体光纤的拉锥过程中采用的方式是快速低温法, 这种方法可以尽量保持空气孔直径和外径的比例不变而使纤芯变细; 而在空气孔膨胀和选择性空气孔塌缩的后处理过程中, 采用的方法是低速高温法, 这种方法可以给光子晶体光纤空气孔足够高的温度和足够长的变化时间, 使其达到想要的变形。本文详细分析和讨论了光子晶体光纤的后处理技术, 利用后处理技术, 可以改变光子晶体光纤的结构参数, 制作各种不同类型的光子晶体光纤光器件。

收稿日期: 2009-04-28; 收到修改稿日期: 2009-06-15

作者简介: 陈子伦(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤激光器和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: zilun2003@hotmail.com

2 光子晶体光纤熔融拉锥机

光子晶体光纤后处理技术都是基于光子晶体光纤熔融拉锥机基础之上的。光子晶体光纤熔融拉锥机,如图 1 所示,是由两个固定并拉伸光纤的光纤移动台和来回移动火苗的火苗移动台组成,移动台所有的控制都是由计算机程序来完成,确保了移动的精确性^[11]。其中产生火焰所用的气体是乙炔和氧气,两种气体的流量和比例可以精确控制,火焰的温度可以通过两种气体的比例来调节,温度可控对精确控制光子晶体光纤空气孔的塌缩变形非常重要。另外如果要实现光子晶体光纤空气孔的膨胀和选择性空气孔塌缩还需要一套光子晶体光纤的充气装置和堵孔装置。利用上述装置可以实现多种光子晶体光纤的后处理技术。

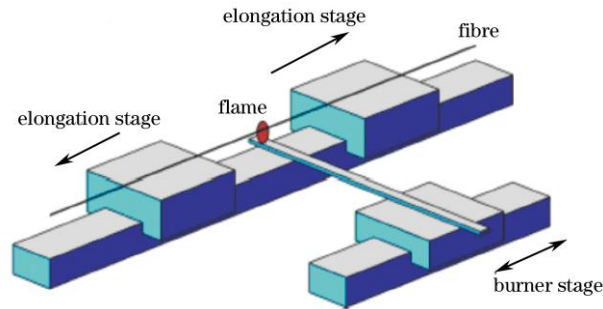


图 1 光纤熔融拉锥机示意图
Fig.1 Schematic diagram of taper rig

3 拉锥技术

普通光纤的拉锥是保持折射率分布不变而改变光纤直径^[11~15],拉锥后可以制作各种各样的耦合器^[16]。然而在熔融拉锥光子晶体光纤的时候,空气孔的表面张力将使空气孔塌缩,因此光子晶体光纤熔融拉锥时会有两种变形^[3]: 1) 光子晶体光纤空气孔和孔间距保持不变情况下芯径变细,如图 2(a)所示; 2) 光子晶体光纤的空气孔在熔融拉锥时受到表面张力的作用而塌缩变小,横截面积基本不变,如图 2(b)所示。光子晶体光纤熔融拉锥后将是这两种变形的结合。

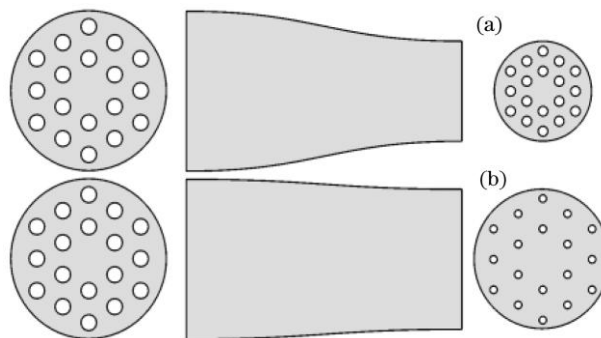


图 2 光子晶体光纤拉锥后结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of tapered PCFs

为了尽量在保持空气孔直径 d 和孔间距 Λ 比例不变的情况下进行拉锥,采用快速低温拉制方法,即光纤移动台相对高速移动,火苗的温度相对较低,这样光子晶体光纤将在大的拉应力下变细,拉锥后 d/Λ 基本保持不变,纤芯变细。光子晶体光纤拉锥可改变其模场直径,用来降低光子晶体光纤和其他光纤的耦合损耗^[17,18]。光子晶体光纤拉锥还可控制光子晶体光纤的色散曲线,从而产生一些非线性效应,例如拉锥后的光子晶体光纤可以制作超连续谱光源^[6,7]。图 3 为光子晶体光纤熔融拉锥后的横截面扫描电镜(SEM)显微照片^[7],利用倍频产生的 532 nm 激光抽运拉锥后的光子晶体光纤实现超连续谱光源。图 4 为光子晶体光纤拉锥后芯径为 0.7 μm 和 0.5 μm 的超连续光源光谱,腰长都为 90 mm。

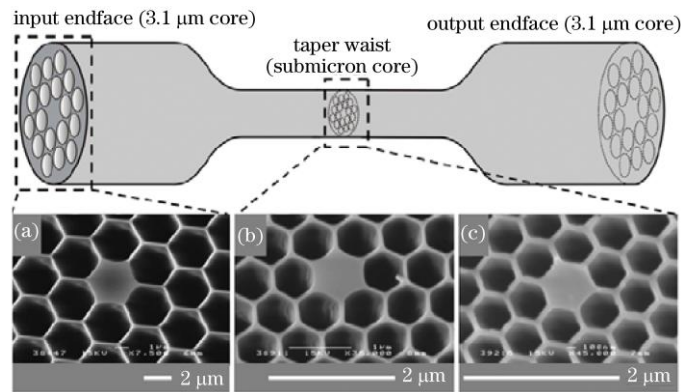


图 3 高非线性光子晶体光纤拉锥后的横向示意图(上)和截面 SEM 图(下)。

(a)未变形光纤; (b), (c)拉锥后锥腰处光纤, 芯径分别为 $0.7 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$

Fig.3 Schematic of the tapered section (top) and scanning electron micrographs (SEMs) of highly-nonlinear PCF (bottom).

(a) initial PCF before processing; (b) taper waist of $0.7 \mu\text{m}$ core

(c) taper waist of $0.5 \mu\text{m}$ core

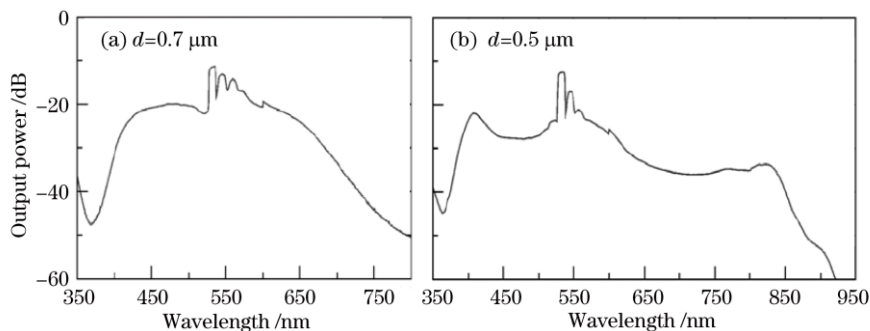


图 4 不同锥腰直径下产生的超连续光源光谱

Fig.4 Supercontinuum spectra generated by PCF cores of different waist diameters

在光子晶体光纤拉锥过程中为了保持空气孔和孔间距比例不变, 采用快速低温控制的方法, 然而充分利用光子晶体光纤空气孔的塌缩, 也可以带来许多额外的应用, 例如光子晶体光纤长周期光纤光栅^[19]和方向耦合器^[20]的制作, 通过空气孔塌缩降低与大模场面积普通光纤的熔接损耗^[21~23]等。

4 膨胀后拉锥技术

光子晶体光纤在熔融拉锥时空气孔受到表面张力的作用将塌缩, 如果在熔融拉锥之前增加空气孔的压强, 熔融加热时空气孔内高压气体产生的压力将超越空气孔的表面张力而使空气孔膨胀, 空气孔变大的程度可由空气孔内压强、熔融加热时间决定。空气孔膨胀过程中, 光子晶体光纤的拉伸距离要很小, 因此膨胀后只改变空气孔间距和孔间距的比例, 而芯径基本不变。光子晶体光纤的空气孔膨胀后, 利用拉锥技术实现空气孔和孔间距保持不变情况下的纤芯变细, 通过膨胀后拉锥技术, 就可以改变光子晶体光纤的任意结构参数。

光子晶体光纤空气孔的膨胀需要满足两个条件: 1) 空气孔内部高压气体产生的压力要大于加热过程中空气孔受到的表面张力, 否则在加热过程中空气孔将塌缩^[24]; 2) 加热时间足够长使光子晶体光纤空气孔有足够的时间膨胀。与拉锥技术处理方法不同, 空气孔膨胀采用的方法为高温低速法, 高温是增加空气孔的膨胀速度, 低速是增加加热时间, 确保空气孔膨胀。整个光子晶体光纤膨胀拉锥处理过程如图 5 所示^[8]。拉锥后光纤芯径为 $2 \mu\text{m}$ 高空气填充比的光纤, 两端是 $5 \mu\text{m}$ 芯径的光纤, 右边分别为 SEM 照片, 比例相同。

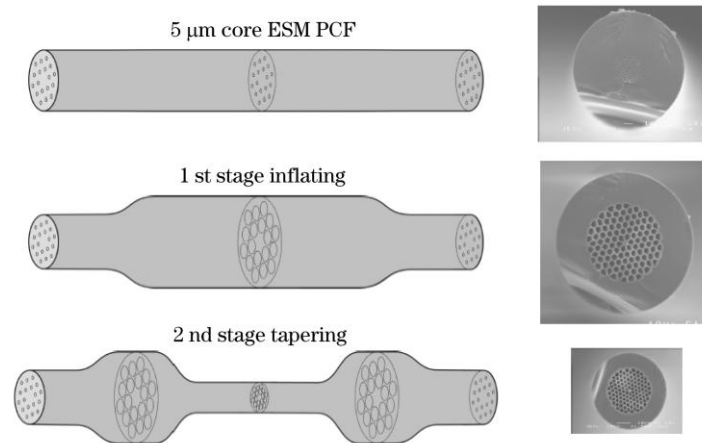


图 5 光纤膨胀拉锥处理过程图
Fig.5 Process of fibre inflation and tapering

光子晶体光纤的膨胀后拉锥处理技术可以改变光纤的空气填充比例和芯径大小，因此根据需要可以得到任意的光子晶体光纤结构参数，虽然处理后光纤的长度只有 15~30 cm，但是这样的长度对于研究非线性已经足够了。利用膨胀后拉锥技术，C. Xiong 等^[9]在无限单模光纤中制作了一种超连续光源，因为处理后的光纤都是连续的，不需要焊接，同时膨胀后拉锥处理技术引入的损耗小于 0.2 dB，所以此超连续光源紧凑性好、损耗小、应用方便。C. Xiong 等^[9]膨胀后拉锥处理的光纤横截面 SEM 照片和超连续光源的光谱分别如图 6 和图 7 所示，所有的 SEM 照片比例相同，超连续光源的谱线又宽又平。

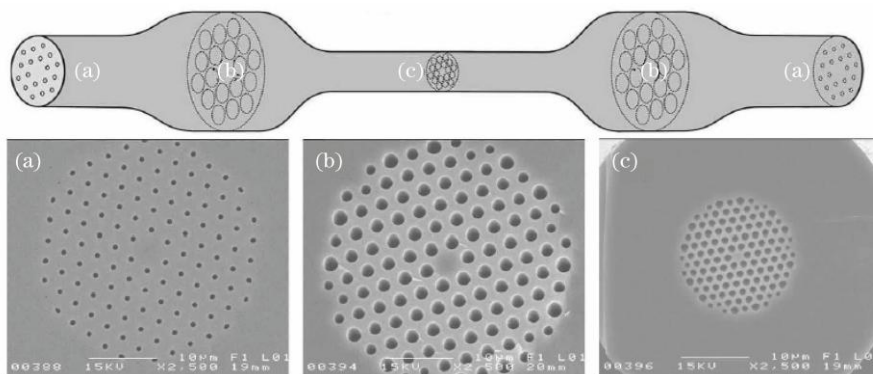


图 6 上图为膨胀拉锥后的光纤横向结构示意图，下图为 SEM 照片。(a) 原始光纤；(b)膨胀后的光纤；
(c)拉锥后的光纤

Fig.6 Schematic of the inflated and tapered section (top) and SEMs of the PCF (bottom). (a) initial PCF before processing;
(b) inflated fiber; (c) tapered fiber

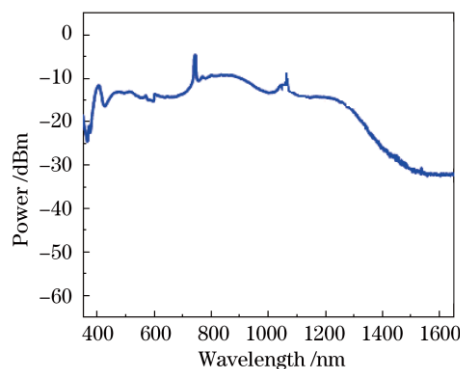


图 7 光子晶体光纤膨胀拉锥处理制作的超连续光源光谱
Fig.7 Spectra of the supercontinuum source by inflating and tapering PCFs

5 选择性空气孔塌缩技术

光子晶体光纤空气孔内部压强超过一临界值时, 加热光子晶体光纤空气孔会膨胀。如果用紫外固化胶堵住其中的几个空气孔, 并在堵孔端进行充气, 空气孔气压达到平衡后, 用熔融拉锥机加热一段光子晶体光纤, 加热部分被堵的空气孔受到表面张力的作用将塌缩, 其他空气孔由于受到内部气体的压力作用而膨胀, 控制加热区域的加热时间, 可以使被堵空气孔恰好完全塌缩, 塌缩后的空气孔与原始纤芯形成一个新的芯区, 通过逐渐缩短加热区域在没有塌缩和完全塌缩区域之间形成一个过渡区域。空气孔选择性塌缩后处理技术的原理如图 8 所示^[10]。由于光子晶体光纤空气孔非常小, 都是微米量级, 所以精确堵孔非常困难, 但是可以利用空气孔膨胀技术使空气孔膨胀, 进而降低空气孔的堵孔难度。图 9 是无限单模光子晶体光纤中一个空气孔被堵的过程。

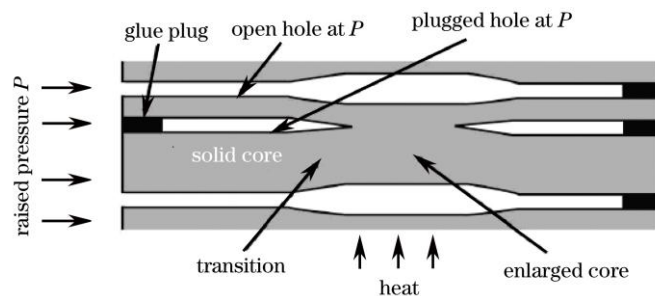


图 8 光子晶体光纤选择性空气孔塌缩示意图

Fig.8 Schematic longitudinal cross section of controlled hole collapse in PCF

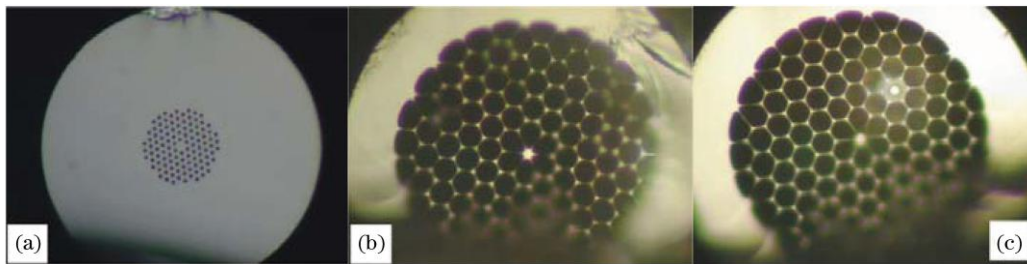


图 9 光子晶体光纤一个空气孔被堵的过程。(a)原始的光子晶体光纤; (b)膨胀后的光子晶体光纤; (c)其中一个空气孔被堵的光子晶体光纤

Fig.9 Inflating-then-blocking procedure for small-pitch PCFs. (a) original fiber; (b) after inflation; (c) with one enlarged hole blocked

在被堵空气孔的一端充气加压, 另一端用熔接机将所有的空气孔塌缩密封, 当光子晶体光纤的空气孔气压达到平衡后, 在熔融拉锥机上加热光子晶体光纤, 在加热区域被堵的空气孔将会塌缩, 其他充气的空气孔将膨胀, 合理设置充气压强, 可以使充气的空气孔保持不形变。加热区域一个空气孔塌缩后的光纤横截面显微镜照片如图 10 所示。

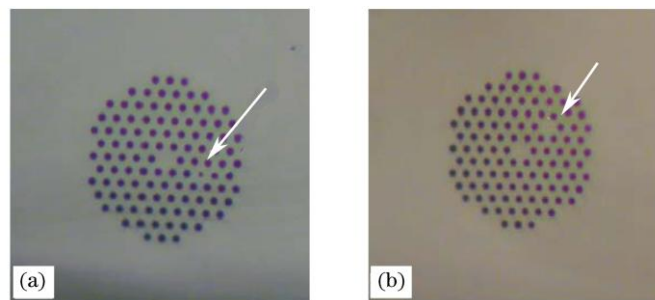


图 10 光子晶体光纤一个空气孔塌缩。(a)过渡区域中被堵空气孔变小; (b) 被堵空气孔完全塌缩, 形成一个新的芯

Fig.10 Micrographs of one hole collapses. (a) hole collapsing; (b) hole disappears in the fiber end face

通过选择性空气孔塌缩技术可以得到任意形状的纤芯, 例如塌缩经过纤芯一条线上的空气孔, 塌缩后空

气孔与原来的芯可形成一个矩形芯, 如图 11 所示。纤芯变形后的远场光斑也变为类似矩形, 从而可以提高光纤与半导体激光器耦合效率。根据实际需要还可以得到环形芯, 矩形变大的芯等^[10], 如图 12 所示。其中模式转化器^[4,5]的制作是选择性空气孔塌缩技术的典型应用, 此种模式转化器不像长周期光栅制作的模式转化器^[25], 不受限于特定的波长范围、不易受环境因素的影响等, 在所有的波长范围内都有效且十分稳定。

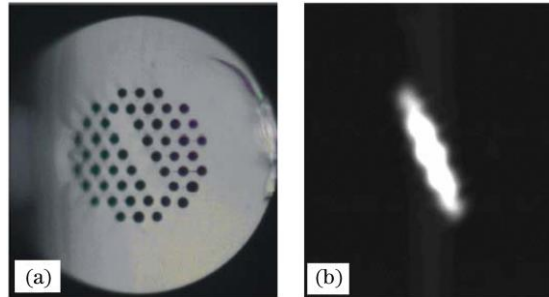


图 11 形成的矩形芯。(a) 4 个孔完全塌缩后的纵向显微镜照片; (b) 4 个孔塌缩后矩形芯的近场光斑
Fig.11 Rectangular core. (a) cross-section after four holes collapse; (b) near field pattern from the cleaved waist of the rectangular core

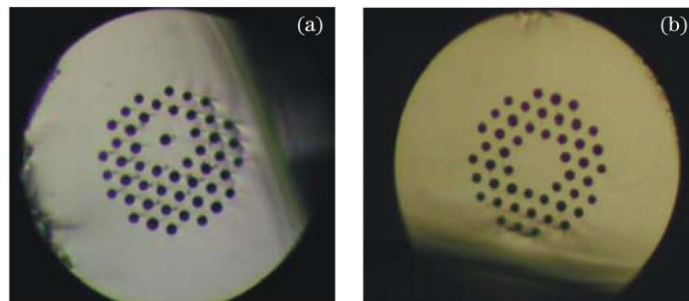


图 12 (a)环形纤芯; (b)芯区增大的纤芯
Fig.12 (a)Annular core; (b) enlarged core

6 分析与讨论

对光子晶体光纤的后处理技术进行了详细的分析和讨论。介绍了光子晶体光纤的拉锥后处理技术和膨胀后拉锥后的处理技术, 利用这两项后处理技术可以任意改变光子晶体光纤的空气孔和孔间距比以及纤径大小, 得到想要的光纤结构参数。介绍了光子晶体光纤的空气孔选择性塌缩后处理技术, 利用空气孔间的压强差, 根据需要可选择性地塌缩空气孔, 从而得到想要的光纤纤芯, 例如矩形芯、环形芯、芯区增大的芯等。在这些后处理技术过程中, 参数的选择非常重要, 例如熔融拉锥机的参数、充气压强等。在参数的选择过程中, 每次对光子晶体光纤处理后, 截断处理后的光纤并利用显微镜进行观测, 然后根据处理后的结果修正参数, 直到得到理想的参数。利用理想参数就可以通过后处理技术实现光子晶体光纤理想变形, 又因为这些后处理技术具有可重复性, 每次利用相同的参数都可以得到相同的后处理效果, 因此在制作一些光子晶体光纤器件时的合格率非常高。

利用光子晶体光纤的后处理技术, 充分挖掘光子晶体光纤的潜在应用价值是当今光子晶体光纤的一个重要发展方向, 因为通过后处理技术可以制作大量的不同种类的、普通光纤难以实现的光子晶体光纤光器件。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Hou Lantian. Present situation and future development in photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(2): 43~58
王 伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(2): 43~58

- 2 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 3 T. A. Birks, G. Kakarantzas, P. St. J. Russell *et al.*. Photonic crystal fibre devices [C]. *SPIE*, 2002, **4943**: 142~151
- 4 K. Lai, S. G. Leon-Saval, A. Witkowska *et al.*. Wavelength independent all-fiber mode converters[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 328~330
- 5 A. Witkowska¹, S. G. Leon-Saval¹, A. Pham¹ *et al.*. All-fibre LP11 mode convertors[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 306~308
- 6 W. J. Wadsworth, A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel light source [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2148~2155
- 7 S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, W. J. Wadsworth *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2864~2869
- 8 W. J. Wadsworth, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibres[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6541~6549
- 9 C. Xiong, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval *et al.*. Enhanced visible continuum generation from a microchip 1064 nm laser[J]. *Opt. Express*, **14**(13): 6188~6193
- 10 A. Witkowska, K. Lai, S. G. Leon-Saval *et al.*. All-fiber anamorphic core-shape transitions [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2672~2674
- 11 T. A. Birks, W. Li. The shape of fiber tapers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4): 432~438
- 12 G. Brambilla, V. Finazzi, D. J. Richardson. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10): 2258~2263
- 13 M. Summetsky, Y. Dulashko, A. Hale. Fabrication and study of bent and coiled free silica nanowires: self-coupling microloop optical interferometer [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3521~3531
- 14 J. D. Love. Spot size. Adiabaticity and diffraction in tapered fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(19): 993~994
- 15 T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1415~1417
- 16 T. A. Birks, S. G. Farwell, P. St. J. Russell *et al.*. Four-port fiber frequency shifter with a null taper coupler[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 1964~1966
- 17 M. Lehtonen, G. Genty, H. Ludvigsen. Tapered microstructured fibers for efficient coupling to optical waveguides [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(7): 295~300
- 18 J. K. Chandalia, B. J. Eggleton, R. S. Windeler *et al.*. Adiabatic coupling in tapered air-silica microstructured optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(1): 52~54
- 19 G. Kakarantzas, T. A. Birks, P. St. J. Russell. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(12): 1013~1015
- 20 G. Kakarantzas, B. J. Mangan, T. A. Birks *et al.*. Directional coupling in a twin-core photonic crystal fiber using heat treatment[J]. *Proc. Quantum Electron. Laser Sci. Conf.*, Baltimore, Maryland, 2001, 125~126
- 21 J. Lægsgaard, A. Bjarklev. Reduction of coupling loss to photonic crystal fibers by controlled hole collapse: a numerical study [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(3): 431~435
- 22 Wang Yanbin, Chen Zilun, Hou Jing *et al.*. One method for effectively increasing mode field diameter of photonic crystal fibers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, in press
王彦斌, 陈子伦, 侯静等. 一种有效的增加光子晶体光纤模场直径的方法[J]. *强激光与粒子束*, 已录用
- 23 L. M. 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
- 24 W. D. Kingery. Surface tension of some liquid oxides and their temperature coefficients[J]. *J. Am. Ceramic Soc.*, 1959, **42**(1): 6~10
- 25 S. Ramachandran. Dispersion-tailored few-mode fibers: a versatile platform for in-fiber photonic devices[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3426~3443