

# 选择性空气孔塌缩技术实现七芯光子晶体光纤 低损耗熔接

张成栋 周旋风 陈子伦 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 多芯光子晶体光纤(MCPCF)是实现高功率超连续谱输出的一个重要研究方向,而如何解决多芯光子晶体光纤的低损耗熔接问题是实现全光纤化的关键。介绍了一种通过选择性空气孔塌缩技术实现七芯光子晶体光纤低损耗熔接的方法。数值模拟了处理前后七芯光子晶体光纤的模场特性以及对熔接损耗的影响。实验上对七芯光子晶体光纤进行了选择性空气孔塌缩处理,实现了和纤芯直径为  $15\ \mu\text{m}$  的双包层光纤的低损耗熔接,损耗值为  $0.22\ \text{dB}$ 。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 七芯; 超连续谱; 选择性空气孔塌缩; 光纤熔接

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1005004

## Low Loss Fusion Splicing for Seven-Core Photonic Crystal Fiber by Selected Air Hole Collapse Technique

Zhang Chengdong Zhou Xuanfeng Chen Zilun Xu Xiaojun

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

**Abstract** The multi-core photonic crystal fibers (MCPCF) is one major research direction to realize high power supercontinuum, and a key problem to realize all-fiber is how to solve the low loss fusion splicing for MCPCF. One method to realize low loss fusion splicing for seven-core PCF by selected air hole collapse technique is introduced. Mode field property and its effect on splicing loss both before and after process are numerically simulated. Selected air hole collapse is achieved for a seven-core PCF experimentally and a low loss ( $0.22\ \text{dB}$ ) is realized for splicing to a double cladding fiber with core diameter of  $15\ \mu\text{m}$ .

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; seven-core; supercontinuum; selected air hole collapse; fiber splicing

**OCIS codes** 060.5295; 060.2280

## 1 引言

光子晶体光纤(PCF)由于具有较高的非线性和灵活的色散特性,因而在超连续谱光源方面有着十分广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。一般产生超连续谱的方法是利用  $1\ \mu\text{m}$  波段的高功率掺镱光纤激光器抽运光子晶体光纤得到。为了获得高功率超连续谱光源,使用的掺镱光纤激光器的输出光纤直径一般为大于  $10\ \mu\text{m}$  的双包层光纤(DCF)<sup>[6-7]</sup>。另一方面,对光子晶体光纤而言,为了更好地实现非线性展宽,又必须

保证较高的非线性系数和匹配的零色散点,这使得光子晶体光纤的纤芯直径被限制在  $5\ \mu\text{m}$  以内。

多芯光子晶体光纤的出现有效地解决了这一难题,因而在高功率超连续谱的产生方面具有很大的潜力<sup>[8-9]</sup>。抽运多芯光子晶体光纤主要有空间耦合和光纤熔接两种方式,但空间耦合结构会降低系统的稳定性和实用性,更为严重的是光纤的输入端面很容易被聚焦后的高能激光损伤,从而限制了输出功率的进一步提升。因而为了获得高功率超连续谱光源,必须

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61370045)、湖南省自然科学基金(12JJ4061)、国防科学技术大学校预研项目(JC12-07-02)

作者简介: 张成栋(1980—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: cdlongtim@gmail.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器和自适应光学方面的研究。

E-mail: xuxiaojun@nudt.edu.cn(通信联系人)

解决多芯光子晶体光纤的熔接问题。一种比较简单的方法是直接塌缩所有空气孔,使得空气孔直径减小,这样可以减小光纤模场失配,进而降低熔接损耗<sup>[10-14]</sup>。但这种方法没有根本改变多芯光纤的模场特性,因而进一步降低熔接损耗受到限制。

本文针对七芯光子晶体光纤介绍了一种基于选择性空气孔塌缩技术的低损耗熔接方法。用有限差分光束传输法对塌孔的七芯光子晶体光纤模场特性和熔接损耗进行数值模拟。实验上进行了七芯光子晶体光纤和双包层光纤的熔接,实验结果和模拟结果基本吻合,表明该方法能够有效地降低七芯光子晶体光纤的熔接损耗。通过该方法,实现了平均功率 116 W 的全光纤化超连续谱输出<sup>[15]</sup>。

## 2 理论分析

实验中采用的七芯光子晶体光纤端面结构电镜扫描(SEM)图片如图 1 所示,光纤中空气孔间距为  $3.26 \mu\text{m}$ ,最内层空气孔直径为  $1.2 \mu\text{m}$ ,其他空气孔直径为  $1.47 \mu\text{m}$ 。据此可以算出单芯的纤芯直径为  $5.32 \mu\text{m}$ ,与普通单芯光子晶体光纤的纤芯直径类似,这也决定了光纤具有良好的非线性特性和合适的零色散点位置。对于此七芯光子晶体光纤,其最大的特点在于等效纤芯可以看作是七芯之和,因而直径约为  $18 \mu\text{m}$ ,这大大提高了光纤的模场面积和高功率承受能力。

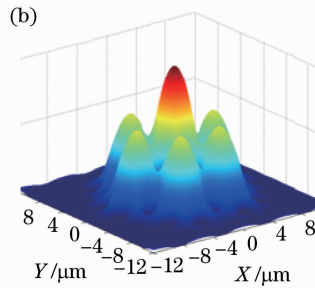
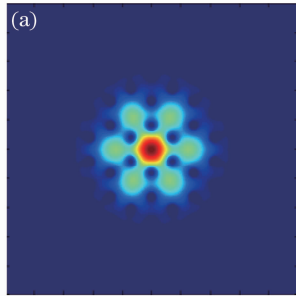


图 2 七芯光子晶体光纤同相位超模模拟图。(a) 二维图像; (b) 三维图像

Fig. 2 Simulated profiles of in-phase supermode in seven-core PCF. (a) 2D image; (b) 3D image

将普通单芯光纤的基模场近似为高斯分布,则可以表示为

$$\psi_s = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega} \exp(-r^2/\omega^2), \quad (3)$$

式中  $\omega$  为基模模场直径,  $r$  为光纤的径向坐标。

由于模场分布的差异,使得七芯光子晶体光纤和双包层光纤直接熔接损耗较大。利用模场分布重叠积分法,可以计算出直接熔接的理论损耗值为<sup>[19]</sup>

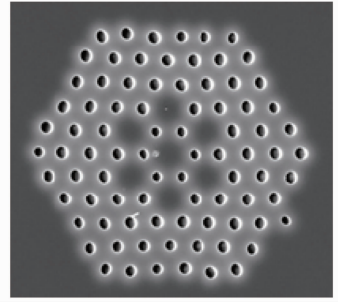


图 1 七芯光子晶体光纤端面电镜扫描照片

Fig. 1 SEM image of the end face of the seven-core PCF

与普通单芯光子晶体光纤不同,七芯光子晶体光纤输出的模式实际上是各芯之间相互耦合而形成的超模,当输出的模式为同相超模时,输出的远场具有准高斯分布<sup>[16-18]</sup>,其模场分布可以表示为

$$\psi_m = (\sqrt{7} - 1)\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 + \psi_5 + \psi_6 + \psi_7, \quad (1)$$

$$\psi_i = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_i} \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\omega_i^2}\right], \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, 7,$$

式中  $\psi_i$  分别代表七个纤芯模的模场分布,  $\omega_i$  为第  $i$  个纤芯模式对应的模场分布。

图 2 是七芯光子晶体光纤同相超模的光场示意图,由图可以看出,这种模场分布实际上是七个纤芯模式相互间耦合的叠加。它的最大特点在于模场分布不是连续的,各个纤芯模之间有凹陷,这与单芯光纤的基模模场分布是截然不同的。

$$\alpha_{\text{Loss}} = -10 \lg \left[ \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_m \psi_s^* dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi_m|^2 dx dy} \right]. \quad (4)$$

减小七芯光子晶体光纤和普通单芯光纤的模场差异是降低熔接损耗的关键,一个有效的方法是进行选择性空气孔塌缩。图 3 为七芯光子晶体光纤进行中心空气孔塌缩前后的端面示意图。

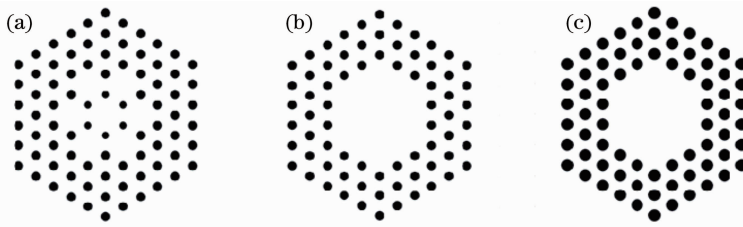


图 3 七芯光子晶体光纤端面示意图:(a) 原始光纤;(b) 中心空气孔塌缩;(c) 周围空气孔膨胀 30%

Fig. 3 Cross section profiles of seven-core PCF. (a) Directly fusion splicing; (b) collapsing central air holes; (c) 30% expanded for outer air holes

通过将七芯光子晶体光纤纤芯之间的空气孔选择性塌缩,使得七个纤芯转变为一个纤芯,这样就可以得到近似的高斯模场分布,实现和双包层光纤的模

场匹配,进而减小二者的熔接损耗。中心空气孔塌缩之后的七芯光子晶体光纤模场分布如图 4 所示。

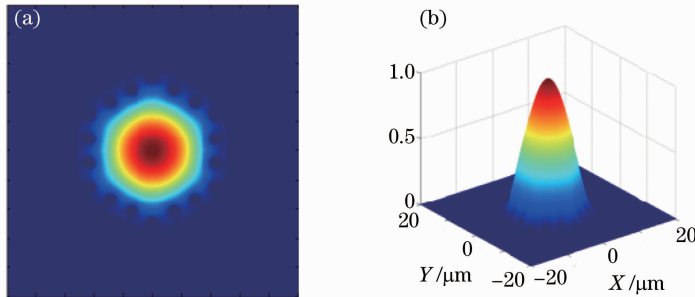


图 4 中心空气孔塌缩七芯光子晶体光纤模场分布模拟图。(a) 二维图像;(b) 三维图像

Fig. 4 Simulated profiles of mode field in central air holes collapsed seven-core PCF. (a) 2D image; (b) 3D image

理论上计算中心空气孔塌缩七芯光子晶体光纤熔接损耗可以利用有限差分光束传输法进行数值模拟。在模拟过程中,在双包层光纤(纤芯直径  $d = 15 \mu\text{m}$ ,数值孔径  $NA = 0.08$ )纤芯中注入稳定的基模光场,功率值设定为 1,然后在输出七芯光子晶体光纤中监测功率,据此得到两种光纤熔接损耗理论值。在模拟塌缩中心空气孔的情况时,塌缩区域设定为一个渐变的区域,长度值设定为 1 cm。数值模拟结果给出的七芯光子晶体光纤和双包层光纤直接熔接损耗为 0.99 dB,选择性塌缩中心空气孔后的熔接损耗如

图 5 所示,其中考虑了周围空气孔膨胀的影响。从图中可以看出,周围空气孔不变中心空气孔塌缩之后光纤熔接损耗为 0.15 dB,周围空气孔膨胀 30%之后损耗为 0.22 dB,理论最小值出现在周围空气孔塌缩为原来的 35%左右,此时损耗小于 0.03 dB。

### 3 实验及结果分析

根据上述分析,熔接过程中最重要的步骤是实现七芯光纤纤芯间空气孔的塌缩,实验中所采用的方法为选择性空气孔塌缩技术。图 6 显示了对七芯光子晶体光纤纤芯之间空气孔进行选择性塌缩的操作过程。首先用紫外胶将光纤端面上所要塌缩的孔堵住,通过紫外光照射进行固化。然后将光纤另

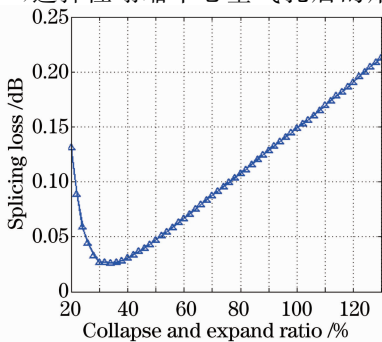


图 5 塌缩后七芯光子晶体光纤熔接损耗与空气孔塌缩和膨胀比例的关系

Fig. 5 Splicing loss of core collapsed seven-core PCF versus air hole collapse and expand ratio

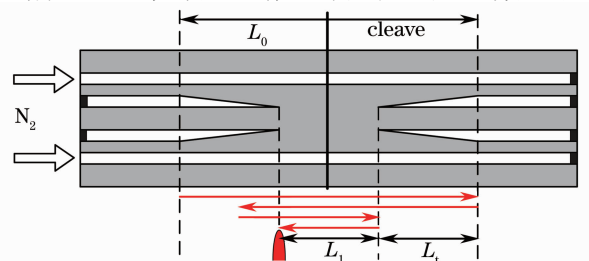


图 6 选择性空气孔塌缩原理示意图

Fig. 6 Schematic illustration of selected air hole collapse

一端全部塌缩,在选择性堵孔端充入  $N_2$ 。最后利用  $H_2-O_2$  焰对充满  $N_2$  的光纤进行加热,就实现了对空气孔的选择性塌缩。

由于光子晶体光纤的材料为二氧化硅,为了保持周围空气孔在加热过程中不塌缩,所需充入  $N_2$  的压强需满足<sup>[20]</sup>

$$P = 0.6 / d, \quad (5)$$

式中  $P$  的单位为 MPa,  $d$  的单位为  $\mu m$ 。

实验中使用的光子晶体光纤周围空气孔直径为  $1.47 \mu m$ ,根据(5)式得到所需要充入  $N_2$  的压强约为 4 个标准大气压(1 个标准大气压为 101 kPa)。增大大气压值可以使得周围空气孔发生一定程度的膨胀。实验中充入  $N_2$  的压强约为 4.5 个标准大气压,  $H_2$  流量为 120 mL/s,  $O_2$  流量为 30 mL/s,对应  $H_2-O_2$  焰的温度大概为  $1500 \text{ }^\circ C$ 。塌缩空气孔的过渡区域长度可以通过改变加热时间来控制。图 6 中

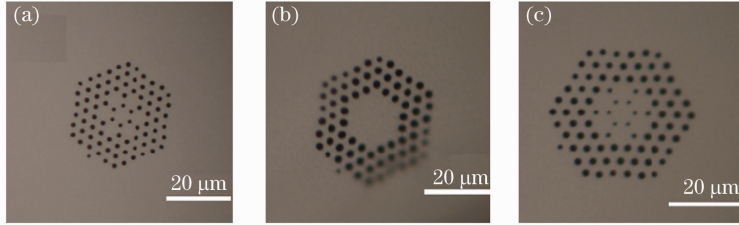


图 7 七芯光子晶体光纤塌孔端面图。(a) 原始光纤; (b) 塌缩区域; (c) 过渡区域

Fig. 7 End face profiles of core collapsed seven-core PCF. (a) Original fiber; (b) collapsed region; (c) transition region

七芯光子晶体光纤的纤芯空气孔塌缩之后,在完全塌缩中心孔处切割,就可以利用普通保偏光纤熔接机进行与双包层光纤的熔接。实验中采用的双包层光纤参数与数值模拟相同,损耗检测方法如图

的火焰复扫“之”字形路径就可以实现对不同位置处的光纤有不同的加热时间,对应的过渡区长度为  $L_t = (L_0 - L_1)/2$ 。实验中重复扫描初始宽度为 5 cm,重复扫描最终宽度为 3 cm,重复扫描次数为 25 次,据此可以得出部分塌缩中心空气孔区域长度为  $L_t = 1 \text{ cm}$ ,满足低损耗渐变条件<sup>[21]</sup>。

实验得到塌缩之后光纤各个位置处的光纤截面图如图 7 所示[图(a)为未经处理的光纤端面;(b)为完全塌缩中心空气孔处的光纤端面;(c)为部分塌缩中心空气孔的光纤端面]。可以看出,处理之后的光纤纤芯变为为了一个整体,纤芯直径明显增大,测量结果为  $15 \mu m$ 。塌缩后的纤芯直径小于原始七芯直径,这是由于原有七芯直径空气孔消失造成的。同时,在塌孔区域周围的空气孔直径也明显变大,这是由于气压略大引起的。

8 所示。首先双包层光纤输出的激光经过包层光滤除之后测量功率记为  $P_0$ ,然后测量熔接后七芯光子晶体光纤输出功率,记为  $P_1$ ,熔接损耗可以表示为

$$\alpha_{\text{Loss}} = -10 \lg(P_1/P_0). \quad (6)$$

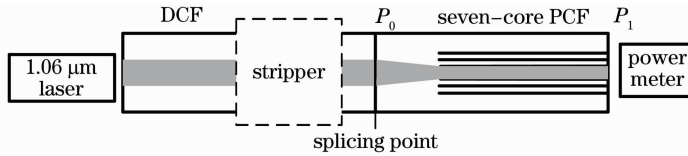


图 8 熔接损耗检测示意图

Fig. 8 Schematic of splicing loss measurement

实验中测量得到两种方法的熔接损耗值以及数值模拟得到的理论值见表 1。通过选择性塌缩中心空气孔的熔接方法,实验上得到的损耗值为

0.22 dB,在光纤激光器双包层光纤平均输出功率为 140 W 的抽运条件下,可以实现这种七芯光子晶体光纤中平均功率为 116 W 的超连续谱输出。

表 1 七芯光子晶体光纤与双包层光纤熔接损耗

Table 1 Splicing losses between seven-core PCF and DCF

	Directly splicing	Central air hole collapsed splicing	Splicing when expanding 30% for outer air hdes
Theory /dB	0.99	0.15	0.22
Experiment /dB	0.97	0.22	—

比较实验结果和模拟结果可以看出,直接熔接时实验损耗值比模拟值要小,这是因为在实际熔接过程中放电会使得空气孔产生一定程度的塌缩,这减小了二者的模场差异。而对于选择性塌缩中心空气孔的熔接方法,实验损耗值 0.22 dB 与周围空气孔膨胀 30% 对应的理论值相吻合,从图 7(b)中可以看出,实验中得到的周围空气孔直径有明显增大。根据理论分析的结果,熔接损耗最低值发生在周围空气孔塌缩为原来的 35% 左右,因而实验上进一步降低熔接损耗是可能的。但是,由于周围空气孔的直径本身比较小,塌缩到更小尺寸有可能带来一些孔的完全消失,同时熔接过程中的放电也可能让空气孔消失,这样会使得光子晶体光纤失去波导特性而无法导光,这也是需要避免的。另一方面,周围空气孔直径大小对熔接损耗的影响相对很小,因而在实际工作中往往采用保持较大空气孔的方式。

## 4 结 论

介绍了一种针对七芯光子晶体光纤的熔接方法——选择性空气孔塌缩技术。通过选择性塌缩七芯光子晶体光纤中心空气孔,七个纤芯变成了一个纤芯,对应模场分布与普通单芯光纤的模场分布类似,这有效解决了七芯光子晶体光纤和双包层光纤的模场差异。理论和实验结果表明,这种方法能够有效降低双包层光纤到七芯光子晶体光纤的熔接损耗。实验上实现了纤芯直径为 15  $\mu\text{m}$  的双包层光纤到七芯光子晶体光纤的低损耗熔接,损耗值为 0.22 dB,并据此实现了平均功率为 116 W 的超连续谱输出。

## 参 考 文 献

- 1 Philip Russell. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358–362.
- 2 Philip Russell. Photonic-crystal fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(12): 4729–4749.
- 3 Stéphane Coen, A H L Chau, R Leonhardt, *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(17): 1356–1358.
- 4 J M Dudley, G Genty, S Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev Mod Phys*, 2006, 78(4): 1135–1184.
- 5 Chen Hongwei, Guo Liang, Jin Aijun, *et al.*. Investigation of hundred-watt-level supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(15): 154207.  
 谌鸿伟, 郭良, 靳爱军, 等. 基于光子晶体光纤的百瓦量级超连续谱光源研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(15): 154207.
- 6 H W Chen, S P Chen, J Hou. 7 W all-fiber supercontinuum source[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(1): 191–193.
- 7 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1943–1949.

- 8 陈胜平, 谌鸿伟, 侯静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1943–1949.
- 9 Chen Hongwei, Wei Huifeng, Liu Tong, *et al.*. Hundred-watt-level supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(4): 044205.  
 谌鸿伟, 韦会峰, 刘通, 等. 七芯光子晶体光纤中百瓦量级超连续谱的产生[J]. *物理学报*, 2014, 63(4): 044205.
- 10 Huang Shisheng, Zhang Gelin, Wei Huifeng, *et al.*. Supercontinuum generation and mode analysis for double cladding seven-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1105002.  
 黄诗盛, 张格霖, 韦会峰, 等. 双包层七芯光子晶体光纤超连续谱的产生及模式分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1105002.
- 11 X Zhou, Z Chen, H Chen, *et al.*. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by controlled air hole collapse[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(24): 5283–5286.
- 12 L Xiao, M S Demokan, W Jin, *et al.*. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(11): 3563–3574.
- 13 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Gunlin, *et al.*. Fusion splicing of small solid core photonic crystal fibers with conventional fibers based on controlled hole collapse[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0106004.  
 奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 普通光纤与小芯径实芯光子晶体光纤的塌孔熔接技术[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0106004.
- 14 Hou Jing, Chen Shengping, Chen Zilun, *et al.*. Recent developments and key technology analysis of high power supercontinuum source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080010.  
 侯静, 胜平, 陈子伦, 等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080010.
- 15 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Post-processing techniques of photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 020602.  
 陈子伦, 侯静, 姜宗福. 光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 020602.
- 16 H Chen, H Wei, T Liu, *et al.*. All-fiber-integrated high-power supercontinuum sources based on multi-core photonic crystal fibers[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20(5): 0902008.
- 17 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Li Yanfeng, *et al.*. Numerical analysis for structure optimization of seven-core photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(4): 2495–2500.  
 方晓惠, 胡明列, 栗岩峰, 等. 七芯光子晶体光纤结构优化的数值分析[J]. *物理学报*, 2009, 58(4): 2495–2500.
- 18 Huang Lili, Fang Xiaohui, Cui Yuanling, *et al.*. Numerical analysis of in-phase supermode selection of seven-core photonic crystal fiber by gain distribution[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 014204.  
 黄莉莉, 方晓惠, 崔元玲, 等. 多芯光子晶体光纤优化掺杂分布实现同相位超模输出[J]. *物理学报*, 2014, 63(1): 014204.
- 19 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun, *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1812–1816.  
 周朴, 侯静, 陈子伦, 等. 多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1812–1816.
- 20 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Liu Zhihai, *et al.*. Coupling approach and mechanism of single-core and twin-core fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(4): 913–917.  
 朱晓亮, 苑立波, 刘志海, 等. 单芯光纤与双芯光纤的耦合方法与耦合机制[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 913–917.
- 21 W J Wadsworth, A Witkowski, S G Leon-Saval, *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2005, 13(17): 6541–6549.
- 22 J D Love, W M Henry, W J Stewart, *et al.*. Tapered single-mode fibres and devices. Part I: adiabaticity criteria[J]. *IEE Proceedings J*, 1991, 138(5): 343–354.