

文章编号: 0258-7025(2010)06-1589-05

# 掺锗芯光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接

李宏雷 娄淑琴 郭铁英 王立文 陈卫国 简水生

(北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 基于全矢量有限元法,在 1550 nm 波段对掺锗芯光子晶体光纤(PCF)与普通单模光纤(SMF)的熔接损耗进行了理论分析,指出模场失配是造成两者熔接损耗大的最主要因素;进而提取自制的光子晶体光纤实际截面数据,更准确地估计出由模场失配引入的熔接损耗。采用电弧放电熔接技术,通过反复实验给出了一组优化的熔接参数,并根据自制的光子晶体光纤具有掺锗芯子而采用重焊操作使得包层孔适量缩塌,可以有效地减小两种光纤的模场失配进而降低了熔接损耗,实现了光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接。

**关键词** 光纤光学;光子晶体光纤;电弧熔接;有限元法;模场半径

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1589

## Low Loss Fusion Splicing of Germanium Doped Core Photonic Crystal Fiber and Standard Single Mode Fiber

Li Honglei Lou Shuqin Guo Tieying Wang Liwen Chen Weiguo Jian Shuisheng

(Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** The principles of the splice loss between the germanium doped core photonic crystal fiber (PCF) and single mode fiber (SMF) at the wavelength of 1550 nm are investigated by the full-vector finite element method. The mismatch of mode field between the PCF and SMF is the main factor resulting in the high splice loss. The real structure profile is extracted to exactly simulate the splice loss due to the mismatch of mode field. Based on the arc fusion technique, a set of optimized fusion parameters are obtained from a series of experiments, and the repeat-discharge operation are used to make sure moderate collapse of the cladding air holes of the germanium doped core PCF. Then the mismatch of mode field could be reduced and the low loss splicing between PCF and SMF is realized.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; arc fusion splicing; finite element method; mode field radius

### 1 引 言

自从第一根光子晶体光纤(PCF)<sup>[1]</sup>问世以来,这种具有奇异特性的光纤受到了国内外学者的极大关注。PCF 较普通石英光纤最大的优势就在于结构设计的灵活性,因而具备了普通光纤无法比拟的优越特性<sup>[2,3]</sup>,并在新颖的光纤设备和光纤传感<sup>[4,5]</sup>领域取得很好的应用,但同样因为 PCF 独特的气孔包层结构,使得它在具有优越特性的同时,也增加了

与其他光纤及器件接续的难度。PCF 要走向实用化,不论是在传输方面还是在做各种光器件方面,耦合接续问题是必须解决的。针对 PCF 与普通单模光纤(SMF)以及不同结构的 PCF 之间的接续难题,诸多研究机构提出了各种解决方案,包括采用电弧熔接机<sup>[6~9]</sup>,CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[10,11]</sup>,梯度折射率(Grade index,GRIN)透镜<sup>[12]</sup>以及采用过渡光纤<sup>[13]</sup>来实现光子晶体光纤的低损耗接续。最近还有文献报道用

收稿日期: 2009-10-22; 收到修改稿日期: 2009-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60777033)和教育部重点项目(308002)资助课题。

作者简介: 李宏雷(1981—),女,博士研究生,主要从事特种光纤和光子晶体光纤的制作与应用等方面的研究。

E-mail: 05111029@bjtu.edu.cn.

导师简介: 简水生(1929—),男,中国科学院院士,教授,主要从事光纤通信、光电子器件、光纤传感、全光网络及电磁兼容等方面的研究。E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

电弧熔接机的缺省参数通过 3 到 4 次重焊的方法熔接 PCF 和几种 SMF, 得到较低的熔接损耗<sup>[14]</sup>, 这种方法对于掺锗芯 PCF 更适用, 即使在熔接点空气孔全部缩塌, 传输的光也不会完全泄露。但是上述工作都是实验工作得到的经验, 在对于光纤中模场的分析方面都是采用完美的 PCF 结构, 对实际结构 PCF 中的模场以及由模场失配引入的损耗少有分析。

本文基于提取自制的 PCF 的实际截面数据, 进而得到其模场分布, 在 1550 nm 波段和 SMF 耦合时, 估算了由模场失配导致的熔接损耗。采用商用电弧熔接机(FSU 975), 通过优化熔接机的熔接参数, 避免了 PCF 包层气孔过度塌陷, 同时根据实验所用的是掺锗芯 PCF 而引入适量重焊过程进一步降低了熔接损耗。由于电弧熔接机对于特种光纤的熔接损耗估算不准确, 因此搭建了熔接损耗测试平台, 能够较准确地给出熔接点的损耗值。

## 2 理论分析

造成光纤熔接损耗的主要因素有光纤对准时的横向偏移、轴向倾斜、两侧光纤的模场不匹配以及在进行切割、熔接操作时对光纤端面的损坏等影响。除了模场不匹配因素外, 其他因素都可以在熔接过程中尽量避免, 在这里认为熔接的准备工作以及光纤的放置对准是没有问题的, 那么模场匹配<sup>[15]</sup>就是两光纤实现低损耗熔接的最主要条件。两侧光纤的模场匹配程度可以用其模场半径来考量, 因此模场半径的计算精度直接决定了熔接损耗估算的准确性, 本文基于精度较高的全矢量有限元法对其进行分析。首先, 计算 PCF 基模电场在横截面上的分布, 由于在三角格子 PCF 中传输的基模光场可以近似地看作高斯型分布, 那么模场的有效面积<sup>[16]</sup>可计算为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \int_{\Omega} |E(x, y)|^2 d\Omega \right]^2}{\int_{\Omega} |E(x, y)|^4 d\Omega}, \quad (1)$$

式中  $E(x, y)$  为基模电场。再由  $A_{\text{eff}} = \pi\omega_2^2$  就可以计算出 PCF 的有效模场半径  $\omega_2$ 。这样就可以利用分析传统光纤的理论公式来推算熔接损耗。如果用  $\omega_1$  表示 SMF 的模场半径, 则两光纤间由模场失配引入的损耗为<sup>[17]</sup>

$$\alpha = -20 \ln \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}. \quad (2)$$

下面从理想截面仿真来计算各种参数对于模场半径的影响, 然后提取实际的截面数据估算由模场失配引入的熔接损耗。

### 2.1 理想截面仿真计算

针对理想截面, 通过改变孔距  $\Lambda$  和空气填充比  $f = d/\Lambda$  分析了 PCF 的模场半径及熔接损耗的变化趋势。计算中石英的折射率设为  $n = 1.444$  (不考虑材料色散), 计算得到 SMF 的基模模场半径  $\omega_1 = 5.2 \mu\text{m}$  (如图 1 中虚线所示); 对于 PCF, 考虑当空气填充比  $f = d/\Lambda$  变化时, PCF 的基模模场半径  $\omega_2$  随着跨距  $\Lambda$  的变化如图 1 所示。可以看出在  $f$  为 0.2 和 0.3 时, 模场半径随  $\Lambda$  并不是线性增加的, 而是在  $\Lambda$  较小区域模场半径随  $\Lambda$  的增加而减小; 在  $\Lambda$  较大区域模场半径近似线性增加。这一现象可以定性地理解为: 模场半径的变化受两个因素制约, 一方面是归一化波长  $\lambda/\Lambda$  减小 (即  $\Lambda$  增大) 会致使模场半径减小; 另一方面是孔距  $\Lambda$  增大会使模场半径增加。只对特定的波长即 1550 nm, 那就是说随着  $\Lambda$  增大, 在两方面的作用下, 模场半径不会是线性变化的, 尤其是在  $\Lambda$  较小区域, 这时  $\lambda/\Lambda$  减小起主要作用, 使得曲线随着  $\Lambda$  增大而减小。在  $f$  为 0.4 和 0.5 且  $\Lambda$  在  $2 \sim 9 \mu\text{m}$  变化时模场半径随  $\Lambda$  增大而近似线性增加且  $f$  小的模场半径大。根据以上模场半径的变化计算熔接损耗, 由图 2 可以看出, 熔接损耗对于不同的空气填充比  $f$  有不同损耗的最低点, 这个最低点正是  $\omega_1 \approx \omega_2$  所对应的, 且随着  $f$  的增大向孔距增大的方向移动, 当偏离这一点 (模场失配) 熔接损耗逐渐增大。图中对应  $d/\Lambda = 0.2$  的曲线有两个最低点恰好对应图 1 中和 SMF 的模场半径相交的两个点。但是  $d/\Lambda = 0.2$  的空气孔在制作中很难持续保持, 所

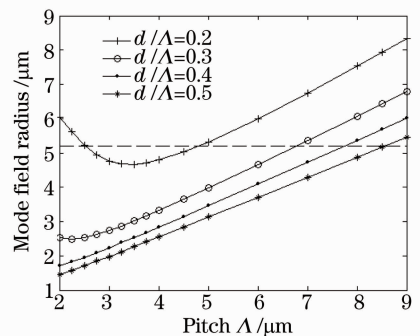


图 1 光子晶体光纤基模模场半径随孔距  $\Lambda$  的变化 (虚线表示 SMF 的基模模场半径)

Fig. 1 Fundamental mode field radius of PCF versus pitch  $\Lambda$  (dashed line is the fundamental mode field radius of SMF)

以这种双解情况一般不会在实际光纤中出现。这样在制作光纤预制棒时就会根据需要的空气填充比选择对应的孔距而使模场匹配。

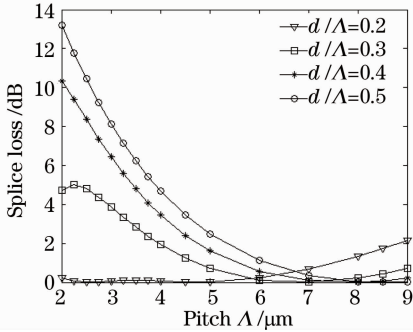


图 2 光子晶体光纤熔接损耗随孔距  $\Delta$  的变化  
Fig. 2 Splice loss of different PCFs versus pitch  $\Delta$

对  $f=0.4$  和  $\Delta=7.8 \mu\text{m}$  的 PCF 结构考虑波长的变化对模场半径的影响,如图 3 所示。随着波长的增加,两种光纤的模场半径都有增加趋势,但 SMF 的模场半径随波长的变化明显快于 PCF 的模场半径,这是因为 PCF 的空气孔包层对光的束缚能力更强。在图 3 中还可以看出在 1550 nm 波段,SMF 模场半径在  $5.2 \mu\text{m}$ ,PCF 的模场半径有  $5.25 \mu\text{m}$ ,由(2)式估算的损耗为 0.00092 dB,这是个可以忽略的值,也就是说如果实际的 PCF 符合  $f=0.4, \Delta=7.8 \mu\text{m}$ ,那么它和 SMF 就是模场匹配的。

通过分析可知,孔距和空气填充比的大小对模场半径都有较大的影响,在光纤预制棒制作之前就应该合理地选取孔距和空气填充比,并在拉丝过程中精确控制控制参数<sup>[18]</sup>来保持 PCF 的截面结构,这样才能从根本上降低 PCF 与 SMF 的接续损耗。

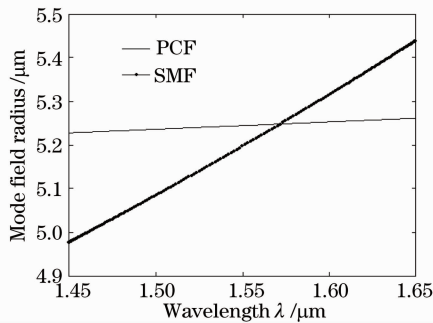


图 3 光子晶体光纤和普通单模光纤模场半径随波长的变化  
Fig. 3 Mode field radius of SMF and PCF versus wavelength

## 2.2 提取实际截面计算

结合自制的 PCF 的实际截面显微照片如图 4(a)所示,其孔距  $\Delta$  约为  $6 \mu\text{m}$ ,孔径约  $5 \mu\text{m}$ ,芯子中掺锗

区直径约  $2.5 \mu\text{m}$ 。纯石英区域折射率由 Sellmeier 公式给出,掺锗区折射率增量为 0.003。用 Matlab 做图像处理提取出实际的横截面结构图[图 4(b)],图中中心小圆孔代表低掺锗的芯子区域。然后加上边界条件各种材料参数,采用有限元法计算出在 1550 nm 处基模电场分布如图 4(c)所示,由(1)式计算出模场的有效面积进而得到模场半径为  $3.7 \mu\text{m}$ ,再由(2)式得出由模场失配造成的熔接损耗约 1.14 dB。

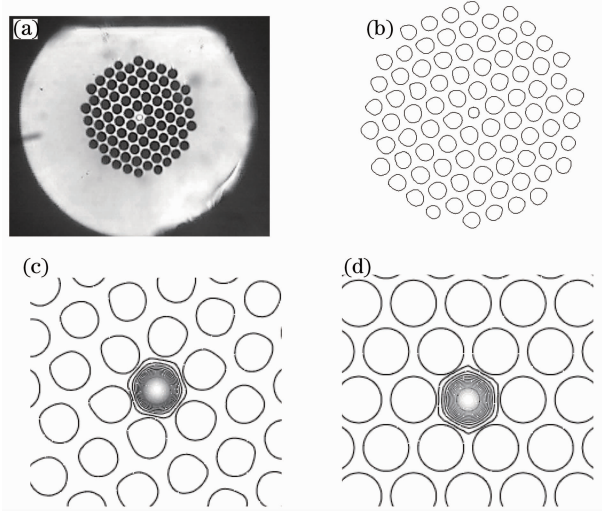


图 4 实际光纤截面及其基模场分布。(a)实验用光子晶体光纤截面图;(b)提取的几何结构图;(c)基模电场分布(1550 nm);(d)理想截面基模电场分布  
Fig. 4 Cross section of the real fiber and its fundamental-mode field distribution. (a) cross section of the experimental PCF; (b) extracted geometrical structure; (c) fundamental-mode field distribution at 1550 nm; (d) fundamental-mode field distribution at 1550 nm of ideal cross section

如果根据图 4(a)的参数用理想截面来估计[其基模场分布如图 4(d)所示]得到模场半径为  $2.68 \mu\text{m}$ ,很显然比实际截面估计的半径小了很多,这样估算的熔接损耗就是 4.1 dB,接近后面实验中测得的总损耗,这显然是估算错误。据此采用提取的实际截面来估算在熔接实验中由模场失配引入的熔接损耗。

## 3 测试实验

由于现有的商用电弧熔接机(爱立信 FSU 975)对特种光纤接头损耗估计不准,为了更准确地测量出光子晶体光纤与普通单模光纤的接头损耗,自行搭建了测试平台。采用电弧熔接机进行反复多次熔接实验,仔细调整得到较适合的熔接参数(如表 1 所示),在保证熔接强度的前提下尽量避免空气孔

过度塌陷。其中预焊过程主要起到预热和清洁作用,在熔接中熔接电流 2 和熔接时间 2 是最关键的参数,它对空气孔的塌缩起主要作用。采用表 1 的参数熔接 PCF 和 SMF 的显微照片如图 5 所示,可以看出在熔接点处 PCF 有少量缩塌且强度较好。在调整好熔接参数后搭建了测试平台,如图 6 所示:首先在两段跳线(FC)中间用普通单模熔接程序熔接 1.5 m SMF,将两根跳线一个接到激光器上,激光器的工作波长设在 1550 nm,另一根跳线接到光功率计(OPM)并设定在 1550 nm 档,这时功率计显示  $-3.75$  dBm[如图 6(a)所示],然后将 SMF 从中间断开,切好端面[如图 6(b)所示],中间接 1 m 长 PCF[如图 6(c)所示],先将接头 C 处 PCF 光纤切好端面,和 SMF 一起放到熔接机 V 型槽里,调整熔接机的控制键使得两光纤基本对准;再用同样型号的另一台熔接机并设置好同样的熔接参数,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的示数进一步精确对准 C, D 点光纤,此过程熔接机一直处于手动模式,两接头的双侧光纤都对准时功率计显示的最好值为  $-8.45$  dBm,此时熔接就能尽量减少由于光纤芯子未对准所引入的损耗。接头 C 和 D 都焊接后功率计显示  $-8.30$  dBm。这样由两个接头和 1 m 长 PCF 引入的总损耗为 4.55 dB,自制的 PCF 用光纤谱损耗分析仪测得在

1550 nm 损耗为 0.21 dB/m,那么平均每个接头为 2.17 dB,去掉估算的由模场失配引入的损耗,每个接头约为 1 dB。

表 1 光子晶体光纤与普通单模光纤的熔接参数

Table 1 Splicing parameters of PCF and SMF

Prefusion time /s	0.2
Prefusion current /mA	8
Over lap / $\mu\text{m}$	5
Gap / $\mu\text{m}$	15
Fusion current 1 /mA	9
Fusion time 1 /s	0.3
Fusion current 2 /mA	10
Fusion time 2 /s	0.5
Fusion current 3 /mA	8.5
Fusion time 3 /s	1.2

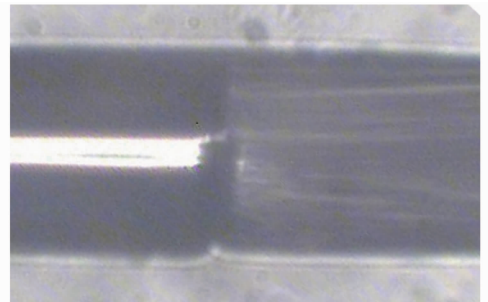


图 5 PCF(右)与 SMF(左)熔接点显微照片

Fig. 5 Micrograph of fusion splices between PCF (right) and SMF (left)

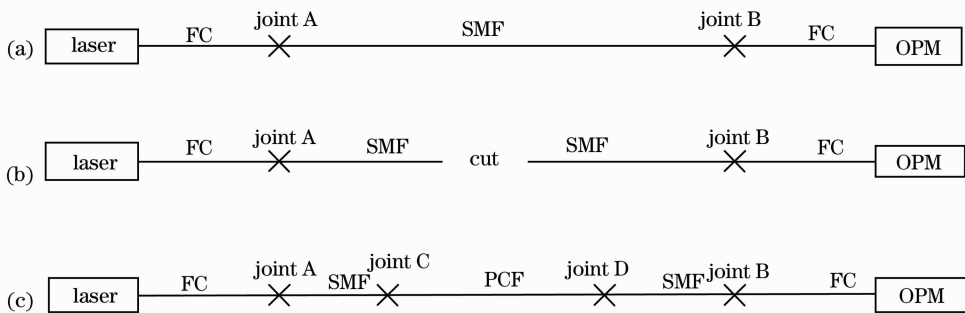


图 6 PCF 与 SMF 熔接测试过程示意图。(a) A 和 B 接头之间接 1.5 m 长 SMF;(b)将 SMF 从中间截断;(c)在 C 和 D 接头之间接 1 m 长光子晶体光纤

Fig. 6 Sketch map of the procedure of splicing between PCF and SMF. (a) splice 1.5 m SMF between A and B;

(b) cut the SMF in the middle; (c) splice 1 m PCF between C and D

根据文献[14],由于 PCF 有掺锗芯,考虑重焊:首先重焊接头 D,第一次和第二次重焊功率计的接收功率显示稍有增加,第三次重焊接收功率就降低很多;然后重焊接头 C,和接头 D 有同样规律,在第二次重焊时功率计显示最高为  $-7.6$  dBm。这样推算去除 PCF 本身的传输损耗后的每个接头损耗为 1.825 dB,若去掉上文中估计的由模场失配引入的

1.14 dB 损耗,那么单纯由熔接引入的损耗约为 0.7 dB。重焊前两次使得接头处 PCF 的空气孔进一步缩塌但还没有完全塌掉,相当于  $f=d/\Delta$  减小,根据前文理论分析这时模场半径会增加,熔接损耗就会减小;而第三次重焊接收功率降低很多说明这时空气孔已经完全缩塌而使束缚光的能力迅速降低,则损耗也就更大。

## 4 结 论

基于全矢量有限元法,优化 PCF 的结构参数可有效降低由于模场失配造成的熔接损耗,提取光纤的实际截面来估算模式的模场分布以及模场半径比理想截面估计更准确。实验中通过调整熔接参数并适当引入重焊操作(两次左右)可以实现掺锗芯光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接。本文的仿真计算和测试实验对于优化光子晶体光纤和普通单模光纤的熔接损耗从而促进光子晶体光纤的实用化有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 3 P. S. J. Russell. Photonic-crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 4 Zhang Guang, Liu Xiaofeng, Chen Qingxi *et al.*. Optical sensing based on photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 41~46  
张光, 刘小峰, 陈庆希等. 基于光子晶体光纤的光学传感[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 41~46
- 5 J. Villatoro, M. P. Kreuzer, R. Jha *et al.*. Photonic crystal fiber interferometer for chemical vapor detection with high sensitivity [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1447~1453
- 6 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  
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
- 7 J. T. Kristensen, A. Houmann, X. Liu *et al.*. Low-loss polarization-maintaining fusion splicing of single-mode fibers and hollow-core photonic crystal fibers, relevant for monolithic fiber laser pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9986~9995
- 8 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
- 9 Fu Guangwei, Bi Weihong, Jin Wa. Mechanics characteristic of air-hole in fusion splicing process for photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2966~2971  
付广伟, 毕卫红, 金娃. 光子晶体光纤熔接过程中的空气孔力学特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2966~2971
- 10 J. H. Chong, M. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1365~1370
- 11 C. Joo Hin, M. K. Rao, Z. Yinian *et al.*. An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO<sub>2</sub> laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 942~944
- 12 A. D. Yablon, 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单模光纤低损耗熔接实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1389~1392
- 14 Y. Wang, H. Bartelt, S. Brueckner *et al.*. Splicing Ge-doped photonic crystal fibers using commercial fusion splicer with default discharge parameters [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7258~7263
- 15 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
- 16 N. A. Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 341~348
- 17 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
- 18 Guo Tieying, Lou Shuqin, Li Honglei *et al.*. Control of the fabrication parameters during the fabrication of photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 412~419  
郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷等. 光子晶体光纤拉制中工艺参数的控制[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 412~419