

光子晶体光纤的低损耗透镜耦合技术

张 璐

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要 基于不失调透镜系统对高斯光束的变换机理, 提出并分析了一种低损耗、高强度连接光子晶体光纤(PCF)的透镜耦合方法。与熔接法相比, 该方法可实现各类 PCF 之间以及 PCF 与普通光纤之间的有效模式转换, 并连接因热膨胀系数极其不同而无法拼接或熔接的光纤。在此基础上, 搭建了相应的 PCF 透镜耦合连接及特性测试实验台, 实现了单模 PCF 和常规 G. 652 光纤之间以及保偏 PCF 和常规 G. 652 光纤之间的高重复性、高强度连接, 连接损耗均值分别为 0.4 dB 和 0.65 dB, 并对实验结果进行了误差分析, 提出了存在的问题及改进设想。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 透镜耦合; 连接损耗; 误差分析

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0106006

Low-Loss Lens-Coupling Technique on Photonic Crystal Fibers

Zhang Lu

(School of Information Science and Engineering, Shandong University,
Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract Based on the aligned lens transformation theory of Gaussian beam, a new lens-coupling method of photonic crystal fibers (PCFs) with low loss and high strength is put forward. Compared with the splicing method, this technique can eliminate the mode mismatch loss between two fibers, and is effective in connecting PCF with any other fibers, or connecting two fibers whose thermo-physical properties are so different that they cannot be spliced or jointed together. A PCF lens-coupling connection and test experimental platform is set up to achieve a 0.4 dB connection loss between endlessly single-mode PCF and G. 652 fiber, and a 0.65 dB connection loss between polarization-maintaining PCF and G. 652 fiber with good repeatability and high strength. Further error analyses, existed questions and improvements are given finally.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; lens coupling; connection loss; error analysis

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.2360; 060.5295

1 引 言

近年来, 光子晶体光纤(PCF)因其独特的结构和性能受到业界的广泛研究和关注^[1-4]。但在实际应用中, 受其特殊结构影响, PCF 很难与其他各类光纤进行高强度、高重复性的低损耗连接^[5-10]。

PCF 的连接损耗主要包括两段待连接光纤因模场失配造成的损耗, 以及光纤端面间的菲涅耳反射损耗。此外, 在熔接等连接方式下引入的附加损耗也不容忽视^[5, 11], 这是因为在熔接过程中 PCF 气孔内极易产生气泡和冷凝液(例如, 当操作间内空气湿度较大, 或操作人员采用无尘试纸蘸乙醇擦拭光

纤表面时, 空气中的水蒸气会进入 PCF 气孔并冷凝成液体), 气孔也会受毛细效应而坍塌, 由此引入的附加损耗往往很大。在现有的 PCF 连接方案中, 电弧熔接法在熔接点两侧区域能实现偶然性的模场变换, 但不能从根本上解决模场失配问题, 连接重复性不理想。引申的熔接方式就是通过引入附加的光纤自聚焦透镜或相位共轭反射镜来实现低损耗的单透镜耦合熔接, 但这类方法受 PCF 结构参数的影响较大, 当连接具有特殊模场形式(模场为椭圆分布或者多边形分布等)的光纤时, 较难实现高重复性的低损耗连接^[5]。此外, CO₂ 激光熔接法比较适合接续大

收稿日期: 2013-06-17; 收到修改稿日期: 2013-09-02

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2011FQ009)

作者简介: 张 璐(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信领域方面的研究。E-mail: luzhang@sdu.edu.cn
(中国光学学会会员号: S042011470S)

孔径 PCF,最低熔接损耗在 1.3 dB~2.8 dB;但设计光子晶体光纤-单模光纤(PCF-SMF)的 CO₂ 激光接续系统极具挑战性,因为纤芯直径差异、纤芯横向偏移、光纤末端填充物、气孔内截留的冷凝液、熔接功率和熔接时间等因素会严重影响光纤的连接质量,在 CO₂ 激光熔接法中,为了使光纤质量退化最小并保证低熔接损耗,操作人员还必须根据每种 PCF 的具体结构参数仔细计算所需的熔接功率和时间^[9]。其他像无熔接拉锥法等同样存在对 PCF 结构要求严格、连接工艺复杂、难以大规模生产等难题^[7-8]。

基于不失调透镜系统对高斯光束的变换机理,本文提出并分析了一种新型 PCF 透镜耦合方法。与前述 PCF 连接方案相比,该方法对连接 PCF 的结构参数无特殊要求,避免了常规熔接法中 PCF 气孔容易坍塌及产生气泡等问题,既能够最大限度地消除模场失配损耗,又能够连接因热膨胀系数不同而无法拼接或熔接的光纤;此外,该方法所用工艺简

单且易于操作,易于实现大规模生产应用。在此基础上,搭建了相应的 PCF 透镜耦合连接及特性测试实验台,分别实现了无尽单模 PCF、保偏 PCF 与常规 G.652 光纤之间的高重复性、高强度连接,并对实验结果进行了误差分析,提出了存在的问题及改进设想。

2 理论分析

2.1 PCF 透镜耦合系统的耦合原理及特性

为实现本文所述的 PCF 透镜耦合方法,所需搭建的球面透镜(C-lens)耦合系统结构如图 1(a)所示。

图 1(a)中,所需的耦合光纤 1 和 PCF 光纤 1' 分别固定在插针 2 和 2' 内;在 2 和 2' 之间从左向右放置扩束透镜 3 和聚焦透镜 3';插针 2 和透镜 3 通过套在两者衔接部分外周的套筒 4 封装构成准直光路部件 5,2' 和 3' 同样通过套筒 4' 封装构成聚焦光路部件 5',5 与 5' 通过套在两者端部外周的套筒 6 封装固定。

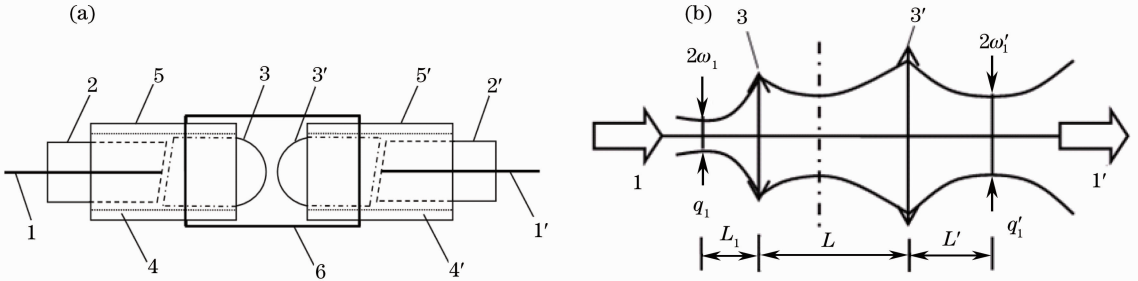


图 1 (a) PCF 透镜耦合连接系统的结构; (b) 相应耦合原理

Fig. 1 (a) Structure of PCF lens-coupling connection system; (b) corresponding coupling principle

在图 1(b)中,假设高斯光束从光纤 1 端向 1' 端传播, L_1 为插针 2 端面与透镜 3 中心的距离, L_1' 为插针 2' 端面与透镜 3' 中心的距离, L 为透镜 3 与 3' 中心的距离, f_3 和 $f_{3'}$ 分别为透镜 3 和 3' 的焦距。据此,耦合系统的光线矩阵可写为^[12]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_1' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中距离值 L_1 、 L_1' 和 L 均可调节,其调节原则是使得光纤 1 端出射光束的束腰 ω_1 经透镜变换后恰好位于光纤 1' 的端面,且变换后的束腰半径 ω_1' 与光纤 1' 的模场半径大小一致。不失调透镜系统进行光束变换的初始条件为^[13]:

$$\begin{cases} L = f_3 + f_{3'} \\ \beta = \frac{f_{3'}}{f_3} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 β 为透镜耦合系统的横向放大率。据此,(1)式中的光线矩阵可写为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta & f_3 + f_{3'} - L_1'\beta - \frac{L_1}{\beta} \\ 0 & -\frac{1}{\beta} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在图 1(b)中,假设光信号的波长为 λ ,光纤 1 端和 1' 端高斯光束的 q 参数分别为 q_1 和 q_1' ,束腰半径分别为 ω_1 和 ω_1' ,可得

$$q_1 = \frac{i\pi\omega_1^2}{\lambda}, \quad (4)$$

$$q_1' = \frac{i\pi\omega_1'^2}{\lambda}, \quad (5)$$

$$q_1 = \frac{A \cdot q_1' + B}{C \cdot q_1' + D}, \quad (6)$$

将 A 、 B 、 C 、 D 元素值代入(6)式,可得

$$\begin{cases} L_1 = \frac{L}{\beta} - \frac{L_1'}{\beta^2} \\ \omega_1 = \beta\omega_1' \end{cases} \quad (7)$$

令(7)式中 $L_1' = f_3'$, 联立(2)式和(7)式可得 $L_1 = f_3$ 。这表明,当入射光束的束腰位于入射方透镜的前焦点处时,出射光束的束腰位于接收方透镜的后焦点上。

由 $\omega_1 = \beta\omega_1'$ 可知,用该系统对高斯光束进行变换时,图 1(b)中出射光束与入射光束的束腰半径之比等于该系统的横向放大率 β ,与入射光束的束腰在光轴上的相对位置无关。因此,可通过改变 β ,即选择合适透镜来实现光束光斑的压缩或扩展,以达到最佳耦合效果。同时,虽然实际 PCF 的模场并非标准高斯分布,但依然在上述计算中将其模场进行高斯近似。结合下文的实验结果可以看出,采用该理论近似是可行的。

综上所述,在实际应用中可以根据光纤 1 和 1' 的模场半径来选择透镜 3 和 3', 选择原则是使透镜焦距比 f_3/f_3' 尽量接近经光纤 1 和 1' 传输光束的束腰半径比 ω_1/ω_1' , 当两者相等时为理想情况。实际操作时,可以根据现有条件选用焦距不同的两个透镜,将焦距大的用作扩束透镜 3, 焦距小的用作聚焦透镜 3'。虽然此时两透镜不共焦,但仍可按照矩阵光学的方法进行计算,并确定一组距离值(L 、 L_1 和 L_1')。即使 3 和 3' 的特性不能与传输光束的特征参数完全匹配,也可以通过调节 L 来达到最佳耦合效果。此外,操作人员还可根据实际情况对图 1 中的透镜进行灵活的增减及排列,甚至在插针 2 和 2' 间增加一个柱面透镜等。

2.2 高斯光束的单透镜成像特性及插针与透镜距离值的确定

由于光路可逆,可以从高斯光束的单透镜成像特性入手,分别研究 SMF 与 PCF 经球面透镜后的像方束腰特性,找出使束腰重合的最佳位置,即可确定插针端面与透镜斜端面之间、以及两透镜之间的距离。为了讨论方便,选取空气折射率 $n_0 = 1$, 球面透镜(材质为 SF-11 玻璃)折射率 $n = 1.7447424$, 透镜型号分别为 R1.419 与 R1.9, 工作波长 $\lambda = 1550$ nm, PCF 的模场分布采用高斯近似,用到的光纤与透镜参数如表 1 所示,其中,球面透镜的长度指的是透镜斜端面中心与球端面中心的间距,如图 2 所示。R1.419 和 R1.9 两种透镜在光通信器件的工业化生产中最为常见,其中 R1.419 透镜用作聚焦,R1.9 透镜用作扩束,

相应焦距分别为 1.905 mm 和 2.953 mm。

表 1 实验中用到的光纤与球面透镜参数
Table 1 Parameters of the optical fiber and the C-lens used in the experiment

| Parameter | Value / μm |
|--|-----------------------|
| Mode radius $W_{1'}$ of SMF (G. 652 fiber) | 5.2 |
| Mode radius W_1 of PCF | 7.3 |
| Curvature radius of C-lens1 | 1.419 |
| Length of C-lens1 | 3.1 |
| Curvature radius of C-lens2 | 1.9 |
| Length of C-lens2 | 4.2 |

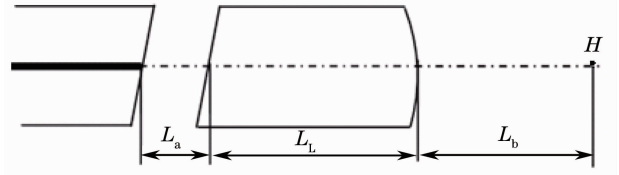


图 2 高斯光束的单透镜成像特性

Fig. 2 Single lens imaging characteristics of Gaussian beam

高斯光束的单透镜成像特性如图 2 所示。此处高斯光束从插针端面出射时的位置即为束腰所在位置,为与图 1(b)中的 L 、 L_1 和 L_1' 进行区别,此处假设光纤插针端面与球面透镜斜端面的间距为 L_a ,像方空间中任意一点 H 到透镜球面中心的距离为 L_b ,球面透镜的长度为 L_L 。注意图 1(b)中的距离值适合于简化的理论分析,而图 2 中的距离值更适合于指导实际操作。在图 2 中,高斯光束从插针端面传播至 H 点所对应的传输矩阵为

$$T(L_1, L_2) = \begin{bmatrix} 1 & L_b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_0 - n}{n_0 \cdot R} & \frac{n}{n_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_0}{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中球面透镜的长度 L_L 和曲率半径 R 可根据表 1 中透镜的具体型号进行取值。当束腰半径为 ω_0 的上述高斯光束从插针端面出射后, q 参数表示为 $q_0 = \frac{i\pi\omega_0^2}{\lambda}$, 该光束经透镜变换后的像方光束 q 参数为

$$q(L_a, L_b) = \frac{A \cdot q_0 + B}{C \cdot q_0 + D}, \quad (9)$$

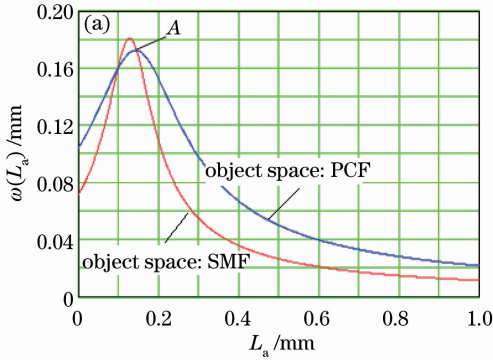
根据(9)式,像方高斯光束的束腰半径可表示为

$$\omega(L_a) = \sqrt{\frac{1}{\frac{-\pi}{1.55 \times 10^{-3}} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{1}{\text{Im}[q(L_a, 0)] \cdot i} \right\}}}, \quad (10)$$

像方光束束腰与透镜球面中心的距离可表示为

$$P(L_a) = -\text{Re}[q(L_a, 0)]. \quad (11)$$

根据(10)式和(11)式,可模拟出高斯光束经球面透镜成像后物距 L_a 与像方束腰大小 $\omega(L_a)$ 和束



腰位置 $P(L_a)$ 的关系。当物方分别为 SMF 和 PCF 时, $\omega(L_a)$ 和 $P(L_a)$ 的变化特性分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

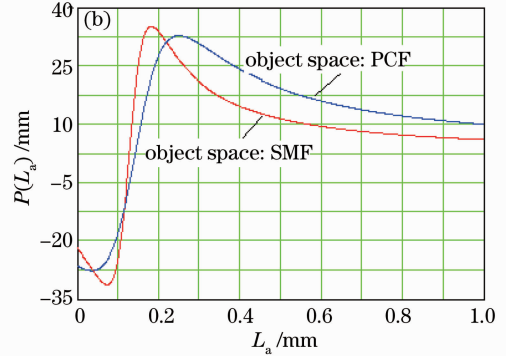


图 3 (a) 像方束腰大小 $\omega(L_a)$ 的变化特性; (b) 像方束腰位置 $P(L_a)$ 的变化特性

Fig. 3 (a) Variation characteristics of the image waist size $\omega(L_a)$; (b) variation characteristics of the image waist position $P(L_a)$

根据经验,当 L_a 在 0.1~0.3 mm 之间取值时,耦合结果通常较为理想。这是因为如果 L_a 取值太大(远大于瑞利距离),入射到插针斜端面的光斑会很大,光束过于发散,耦合效果不理想;若 L_a 值太小,图 2 中经过球面透镜成像后的束腰就不在透镜球面右侧[表现为图 3(b)中的 $P(L_a)$ 为负];此外, L_a 的取值也不能使 $P(L_a)$ 过大,否则两个球面透镜间距会很大,不便于加工。

上可以完全消除模场失配损耗。但是,实际 PCF 的模场不一定是高斯分布,因此会有一些的误差,误差大小基本由 PCF 的模场与高斯分布的偏离程度所决定(实验结果详见第 3 节);同时,插针 2' 端面未镀增透膜也会引入一定的菲涅耳反射损耗,即^[5]

$$\Gamma' = -20\lg\left[1 - \left(\frac{n_c - 1}{n_c + 1}\right)^2\right]. \quad (13)$$

式中,当纤芯折射率 $n_c = 1.5$ 时,菲涅耳反射损耗约为 0.17 dB。因此,受 PCF 模场分布的非理想性、以及 0.17 dB 反射损耗的叠加影响,图 1 中透镜耦合装置的损耗应该略大于 0.17 dB。

据此,取图 3(a)中的 A 点作为满足条件的一种情况,此时 SMF 端和 PCF 端的插针与各自球面透镜斜端面的距离 L_a 均为 0.146 mm。根据图 3(b),此时 SMF 端和 PCF 端的光束束腰与各自球面透镜球面中心的距离分别为 21 mm 和 3.675 mm,两球面透镜间距则为这两个距离的和,等于 24.675 mm。

2.3 关于耦合装置残存损耗的讨论

3 实验验证

在实际操作中,图 1(a)所示的耦合装置仍然有微量的连接损耗,包括残存的菲涅耳反射损耗、模场失配损耗以及因实际 PCF 端面清洁不彻底引起的微量损耗等。理论计算表明,把 PCF 的模场看作圆对称高斯模场时,若不经模场变换直接连接,在角向以及径向均对准的情况下,模场失配损耗可表示为^[3]

为验证上述理论分析的正确性,下面分别选用模场为圆对称分布的无尽单模 PCF 以及模场为轴对称分布的保偏 PCF 来与常规 SMF(G. 652)进行耦合实验(光纤的具体指标见表 2,表中 D' 表示模场

$$\Gamma = -20\lg\left(\frac{2W_T W_R}{W_T^2 + W_R^2}\right). \quad (12)$$

式中 W_T 和 W_R 分别为与测试光源连接的发射端光纤和与光功率计连接的接收端光纤的模场半径。根据(10)式,表 1 中的 G. 652 光纤和单模 PCF 直接连接时的模场失配损耗约为 0.25 dB。

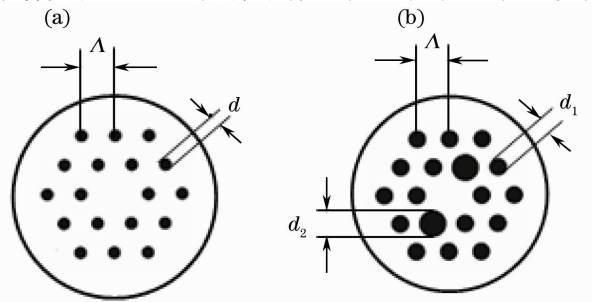


图 4 实验所用的(a)无尽单模 PCF 和(b)保偏 PCF 的横截面结构示意图

Fig. 4 Cross-section structures of PCFs used in the experiment. (a) Endless single-mode PCF; (b) polarization-maintaining PCF

此时,若采用图 1(a)所示装置进行光纤连接,两光纤的模场经过透镜变换后已经较为匹配,理论

直径, τ 表示差分群时延), 两种 PCF 的横截面示意图如图 4 所示。

表 2 实验所用的无尽单模 PCF 和保偏 PCF 的技术指标
Table 2 Qualification of the endless single-mode PCF and polarization-maintaining PCF used in the experiment

| | Single-mode PCF | Polarization-maintaining PCF |
|------------------------------------|--------------------------------|--|
| Core diameter / μm | 13 ± 0.3 | 6.98 ± 0.20 |
| Cladding diameter / μm | 125 ± 5 | 125 ± 5 |
| Hole area diameter / μm | 55.6 ± 1.6 | 95.9 ± 2.8 |
| Hole diameter / μm | 3.27 ± 0.08 | 3.49 ± 0.09 (small hole) 6.40 ± 0.20 (large hole) |
| Hole space / μm | 8.18 ± 0.20 | 3.49 ± 0.09 (small hole) |
| Others | $D'_{1550} = 14.5 \mu\text{m}$ | $\tau \leq 1 \text{ ns/km}$ |

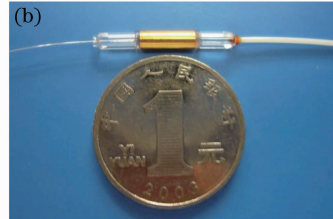
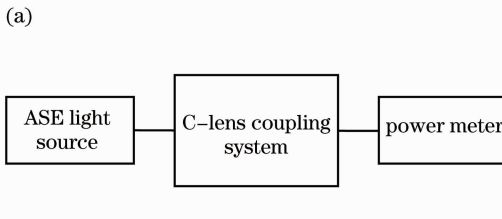


图 5 (a)实验装置的原理框图;(b)单模 PCF 与常规 SMF(G. 652)的连接实物图

Fig. 5 (a) Schematic diagram of experimental apparatus; (b) picture of the connection apparatus between single-mode PCF and normal SMF (G. 652)

接下来,分别将距离值 L_1 、 L_1' 和 L 调节到各自的理论值附近;然后在此基础上对 Newport 五维微调架进行切向、径向及角向的微调,并实时记录光功率计的最小显示值。实验测得的插入损耗典型值为 0.4 dB,且连接的强度和重复性均较好。分析可知,该 0.4 dB 损耗主要包含以下部分:1)因 PCF 插针端面未镀膜而引入的菲涅耳反射损耗,其理论值约为 0.17 dB;2)PCF 端面清洁不彻底所引入的微量损耗,以及图 1(a)中部分光路元件的角向或径向微移损耗;3)残存的模场失配损耗,这是因为 PCF 的实际模场并不是标准高斯分布,所以与 2.3 节给出的模场失配损耗理论值(0.25 dB)本身就有少量误差,而图 1(a)所示的透镜耦合装置也会留有微量的模场失配损耗。但是,考虑到 0.4 dB 的损耗典型值中已经包含了上述 1)和 2)的影响,耦合装置中残存的模场失配损耗已经很小,即将 PCF 模场进行高斯近似的误差已经很小,因此在理论分析中将 PCF 的模场进行高斯近似是可行的,耦合装置也已经在最大限度上消除了模场失配损耗。

此外,还根据文献[5]的熔接方法,本文采用表 2 中的单模 PCF 进行了熔接实验,发现此类特殊结构 PCF 的最小熔接损耗为 1.8 dB。并且,与普通光

纤的熔接过程相比,PCF 熔接过程中,为尽可能减少气泡的产生,最低熔接损耗所对应的熔接电流和放电时间等参数均较小,而这会导致光纤连接强度低、重复性差。这是因为 PCF 的模场并不是标准的高斯型分布,而且单透镜熔接法更适用于大模场直径光纤的连接(例如低弯曲损耗光纤与普通 SMF 连接)。此外,考虑到 PCF 中的微孔效应,熔接工艺似乎更适用于实芯 PCF 的连接^[8,11]。

对于模场分布为非圆对称型的 PCF[如对于图 4(b)和表 2 所示的保偏 PCF],如果仍采用图 1(a)中的两透镜结构,其耦合损耗典型值为 0.65 dB;如果在图 1(a)所示光路中添加一个柱面透镜来实现进一步的模场变换,损耗可达降 0.2 dB 以下。

4 结 论

介绍了一种 PCF 透镜耦合方法,并以单模 PCF 和常规 G. 652 光纤之间、以及保偏 PCF 和常规 G. 652 光纤之间的透镜耦合为例进行了实验验证。理论分析和实验结果均表明,若在进行某类型 PCF 的连接前,先根据待连接光纤的透镜变换特性找出使像方束腰重合的最佳位置,进而确定插针与透镜

端面的间距、以及两透镜的间距,便可得到高强度、高重复性的低损耗连接。虽然此方法需要借助光纤对接平台进行 PCF 的透镜耦合连接,表面上较为复杂,但在工业化的批量加工中,由于平台在首次搭建成功后无需再拆装改动,仅需要根据不同光纤和透镜的参数进行部分光学器件的位置微调,所以并不复杂。误差分析进一步表明,因为 PCF 的模场并不是标准高斯分布,所以两根待连接光纤的模场还会存在一定的模场失配损耗。即使不考虑透镜像差以及其他因素(如工艺不完善等)引入的损耗,该耦合系统的插入损耗也不为 0。若能测得或消除 PCF 端面的菲涅耳反射损耗,并增加 PCF 端面的清洁程度,实验结果能得到进一步的改善。此外,因上述损耗与两透镜的相对折射率有关,所以可通过在气密封装盒内充入惰性气体来改变透镜耦合系统的相对折射率,或选择与传输光束的特征参数完全匹配的扩束透镜和聚焦透镜等。

致谢 本论文所涉及的实验均在武汉光迅科技股份有限公司完成,感谢武汉光迅科技股份有限公司的胡强高、张均两位高级工程师的技术支持和帮助。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 F Couy, F Benabid, P S Light. Reduction of Fresnel back-reflection at splice interface between hollow core PCF and single-mode fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(13): 1020-1022.
- 4 Li Wei, Chen Hui, Chen Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0205002.
黎 薇,陈 辉,陈 明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0205002.
- 5 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.
- 6 B Bourliaguet, C Pare, F mond, *et al.*. Microstructured fiber splicing [J]. *Opt Express*, 2003, 11(25): 3412-3417.
- 7 Yang Qing, Shi Jielong, Sun Weisheng, *et al.*. Low-loss splicing based on the technique of mode-field matching by fusion taper rig [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006001.
杨 清,施解龙,孙伟胜,等. 基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体光纤低损耗熔接[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006001.
- 8 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, *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.
- 9 J H Chong, M K Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Opt Express*, 2003, 11(12): 1365-1370.
- 10 J T Lizier, G E Town. Splice losses in holey optical fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(8): 794-796.
- 11 L M 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.
- 12 Zhang Lu, Hu Qianggao, Zhang Di, *et al.*. Coupling Method and Apparatus of Photonic Crystal Fibers [P]. CN 200710060299, 2007.
张 璐,胡强高,张 均,等. 光子晶体光纤的耦合方法及其耦合装置 [P]. CN 200710060299, 2007.
- 13 Fedor Mitschke. *Fiber Optics: Physics and Technology* [M]. Germany: Springer, 2010. 23-82.

栏目编辑: 王晓琰