

空芯反谐振光纤与单模光纤的低损耗熔接研究

李晓倩, 高寿飞, 汪滢莹*, 王璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 光子晶体光纤因具有设计自由、导光机制新颖等优势而被人们广泛关注。相比于带隙型光子晶体光纤和 Kagome 光纤,空芯反谐振光纤(HC-ARF)由于具有结构简单、单模导光、传输谱宽且损耗低的特点,在紫外/中红外光传输、高功率激光产生、非线性光学及传感等领域都具有很好的应用。但是 HC-ARF 要真正得到广泛应用,其与普通单模光纤的熔接必须简便且损耗低,然而,HC-ARF 包层特殊的毛细管孔结构在熔接过程中容易坍塌,且其模场直径不同于普通单模光纤,故直接熔接时损耗很大。为此,引入一段纤芯直径为 20 μm 的实芯大模场光纤作为模场过渡,实现了 HC-ARF 和普通单模光纤之间的熔接,熔接损耗由直接熔接的 3 dB 降至 0.844 dB。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 熔接损耗; 过渡光纤; 空芯反谐振光纤; 模场匹配

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1006002

Low-Loss Fusion Splice of Hollow-Core Anti-Resonant Fiber and Single Mode Fiber

Li Xiaoqian, Gao Shoufei, Wang Yingying*, Wang Pu

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China;

Abstract Photonic crystal fibers have attracted intensive attention because of its advantages of a freedom design and a novel light guiding mechanism. Compared with photonic bandgap fibers and Kagome fibers, the hollow-core anti-resonant fibers (HC-ARF) exhibit excellent optical properties in terms of simple structure, single mode transmission, broad transmission bandwidth and low optical attenuation. HC-ARF is suitable for UV/mid-IR light transmission, high power laser generation, nonlinear optics, sensing and so on. However, in order for HC-ARF to be widely used, the fusion of HC-ARF and a conventional single-mode fiber must be simple and low-loss. While, because the special cladding capillaries of HC-ARF are easily destroyed during splicing, and the mode field of HC-ARF is different with single mode fiber, the direct splicing technique easily leads to a large loss. So we use a solid-core large mode area fiber with a core diameter of 20 μm as an intermediate, to obtain a low-loss fusion splice between a HC-ARF and a conventional single mode fiber. Compared to the direct splicing technique, which yields a splice loss of 3 dB, the intermediate fiber technique makes the overall insertion loss decrease to 0.844 dB.

Key words fiber optics; photonic crystal fibers; splice loss; intermediate fibers; hollow-core anti-resonant fibers; mode field match

OCIS codes 060.5295; 060.2310; 060.2360

1 引 言

空芯光子晶体光纤因其利用纤芯的空气导光而具有超低的瑞利散射和非线性系数,可以实现超低损耗和弱非线性效应的光传输^[1-2]。此外,空芯光子晶体光纤还可以提供更高的传播速度(即更小的延迟)和激光损伤阈值^[3]。其中空芯反谐振光纤(HC-ARF)除了具有上述特点外还具有结构简单、传输

谱更宽、损耗更低的优势^[4]。在光纤通信、光纤传感、非线性光学、高能激光传输等领域扮演着重要的角色^[5-8]。然而在实际应用中 HC-ARF 与普通单模光纤(SMF-28)的熔接存在问题。由于空芯反谐振光纤包层特殊的毛细孔结构,在熔接放电过程中容易坍塌,易引起很高的熔接损耗,此外,HC-ARF 模场直径不同于普通单模光纤,故直接熔接的方法对其不再适用。如何实现熔接后结构完整、传输特性

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-04-28; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(10101999201602)

* E-mail: wangyingying@bjut.edu.cn

不变、熔接损耗较小的 HC-ARF 是其走向实用化亟需解决的问题。

目前市场上光纤熔接机基本都是针对普通实芯光纤的熔接设计的,由于 HC-ARF 包层结构特殊,这些熔接机程序无法直接熔接,因此需要寻找其他合适的熔接方法。2014 年,北京工业大学 Gao 等^[9]对带隙型空芯光子晶体光纤与普通单模光纤熔接损耗作了理论分析和实验研究,在实验中通过引入一段高归一化频率 V 值的过渡光纤,得到带隙型空芯光子晶体光纤和普通单模光纤间的最低熔接损耗为 0.73 dB,为模场不匹配的实芯光纤和空芯光子晶体光纤的熔接提供了技术指导。2015 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所的郝军等^[10]通过向空芯光子晶体光纤中充气,研究了单模光纤和空芯光子晶体光纤熔接问题,将空芯光子晶体光纤两端均熔接单模光纤,两个熔接点总的损耗小于 2 dB。2017 年,国防科技大学的张乃千等^[11]提出将实芯光纤拉锥后插入到 Ice-cream 型空芯反谐振光纤的低损耗耦合方案,实验得到了 96.05% 的耦合效率。该方案虽然可以得到很高的耦合效率,但是需要在显微镜下操作,制作过程复杂。

本文对 HC-ARF 和单模光纤的熔接问题进行了详细研究。分析了影响 HC-ARF 熔接损耗的因素,使用商用的多物理场有限元分析软件 Comsol 结合 Matlab 软件理论仿真了光纤的模场轮廓和耦合损耗,实验中通过引入一段与 HC-ARF 模场更匹配的实芯大模场光纤作为过渡光纤,降低了 HC-ARF 与普通单模光纤的熔接损耗。本方案在光纤熔接机上就可完成,制作过程简单方便。

2 熔接损耗分析

熔接损耗的大小直接影响熔接后光纤的性能,因此了解影响熔接损耗的因素是实现低损耗熔接的必要前提。影响 HC-ARF 熔接损耗的因素有许多^[11],主要包括:光纤之间的对准、HC-ARF 包层空气孔^[12]的坍塌、模场失配、光纤端面的影响等。

2.1 光纤之间的对准

光纤之间精确的对准可以减小光纤端面的散射损耗,保证两根光纤中传输光能够高效地耦合。影响光纤之间对准的因素主要有:熔接机夹具对光纤几何形状的影响、夹具夹持光纤的位置以及光纤放置的位置等因素。其次,光纤切割刀切割质量、熔接机的对准精度,也会影响光纤之间的对准。目前市面上出售的光纤切割刀和熔接机在正确的前提下

下基本可以实现无角度或小角度切割,并实现精确对准。

2.2 HC-ARF 包层空气孔的坍塌

在使用熔接机熔接光纤过程中,熔接机先进行预放电软化光纤端面,再通过马达向内推压光纤,使融化的光纤接触,最后在接触点位置进行主放电,以增加接点机械强度完成光纤熔接。由于 HC-ARF 的包层毛细管壁的厚度仅有几百微米,所以 HC-ARF 端面的熔点小于实芯光纤的熔点。在放电过程中,包层毛细管受热容易坍塌,导致 HC-ARF 波导结构破坏,此处传输光的泄露会引起较高的熔接损耗。Xiao 等^[13]优化熔接参数,使放电电极偏离空芯光子晶体光纤和实芯光纤中心一定位置,优化放电电流和时间,采用小电流多次放电的方法,将对空芯光子晶体光纤包层毛细管的破坏降至最低,得到了较低的熔接损耗。

2.3 模场失配

由模场失配引起的耦合损耗(单位取 dB 形式)可表示为^[14]

$$N_{\text{loss}} = -20 \lg \left(\frac{2\omega_{\text{ARF}}\omega_{\text{SMF}}}{\omega_{\text{ARF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2} \right), \quad (1)$$

式中: ω_{ARF} 和 ω_{SMF} 分别为 HC-ARF 和单模光纤的模场半径。由(1)式可知,当两光纤模场直径相等或者相差不大时,由模场不匹配引起的损耗最小。由此可得,对于模场直径相近的两光纤,通过调节熔接参数,保持 HC-ARF 包层结构完整,就可以降低熔接损耗。然而对于模场直径相差较大的光纤,尽管 HC-ARF 空气孔结构没有破坏,但熔接损耗仍然很大,这主要是光纤模场不匹配导致传输光泄露引起的。2016 年,法国利摩日大学的 Zheng 等^[15]第一次通过拉锥的方法实现内摆型 Kagome 光纤与普通单模光纤的模场匹配,得到从普通单模光纤到 Kagome 光纤的最低熔接损耗为 0.48 dB。

2.4 光纤端面的影响

由于 HC-ARF 和普通实芯光纤端面的折射率分布不同,当光在端面传输时,会发生菲涅耳反射;同时因 HC-ARF 与普通实芯光纤连接处的波导介质不均匀,传输光会发生瑞利散射。散射和反射都会导致熔接损耗增大,所以在熔接前光纤预处理环节(包括端面切割、清洁等过程)非常重要。

3 耦合损耗的有限元仿真

使用 Comsol 软件通过有限元方法模拟了 HC-ARF 和实芯大模场光纤的模式轮廓,两根光纤对接

点处的耦合损耗为^[16]

$$N_{\text{loss}} = 1 - \left| \frac{2\langle \mathbf{E}_t | \mathbf{H}_i \rangle \langle \mathbf{E}_i | \mathbf{H}_t \rangle}{\langle \mathbf{E}_t | \mathbf{H}_i \rangle + \langle \mathbf{E}_i | \mathbf{H}_t \rangle} \right|^2, \quad (2)$$

式中： $\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i$ 分别是实芯大模场光纤基模的归一化电场和磁场矢量； $\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t$ 分别是 HC-ARF 基模的归一化电场和磁场矢量。其中归一表达式为

$$\langle \mathbf{E}_i | \mathbf{H}_i \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\iint dA (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*) \cdot \hat{\mathbf{z}} \right] = 1, \quad (3)$$

式中： A 代表光纤横截面面积； $\hat{\mathbf{z}}$ 为 z 方向的单位矢量。(3)式涉及的光纤端面的因素包括菲涅耳反射和模式尺寸。

仿真所用 HC-ARF 的纤芯直径为 $30 \mu\text{m}$ ，外包层直径为 $200 \mu\text{m}$ ，空气孔直径为 $13 \mu\text{m}$ 。基于上述公式，仿真结果如图 1 所示。

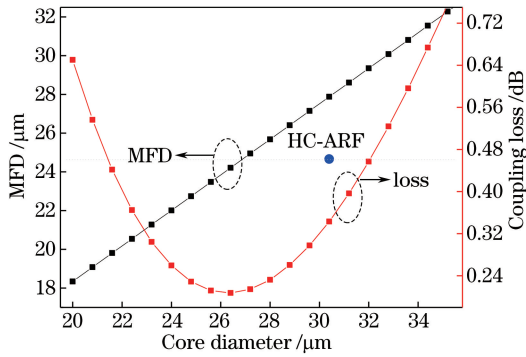


图 1 空芯反谐振光纤和实芯光纤间耦合损耗

Fig. 1 Coupling loss between HC-ARF and solid-core fiber

图 1 给出了模场直径 (MFD) 和耦合损耗随纤芯直径变化的关系曲线。图中蓝色点为 HC-ARF 的模场直径为 $24.66 \mu\text{m}$ 。从图中黑色曲线可以看出，实芯光纤纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$ 时，对应模场直径为 $18.34 \mu\text{m}$ ，与 HC-ARF 的耦合损耗是 0.64 dB 。随着纤芯直径的增加，模场直径几乎呈线性增加。从图中红色曲线可以看出，随着纤芯直径的增加，耦合损耗呈现出先减小后增加的趋势。当纤芯直径增加至 $26.4 \mu\text{m}$ 时，对应的损耗最小，最小值为 0.207 dB ，此时对应实芯光纤的模场直径为 $24.21 \mu\text{m}$ ，稍小于空芯反谐振光纤的模场直径。

4 光纤熔接实验

实验中使用的 HC-ARF 为 7 芯 HC-ARF，其截面照片如图 2(a) 所示，纤芯直径约为 $30 \mu\text{m}$ ，外包层直径为 $200 \mu\text{m}$ ，空气孔直径为 $13 \mu\text{m}$ 。光纤在波长 1550 nm 处表现出单模传输，如图 2(b)，采用模式质量分析仪测得模场直径约为 $25.2 \mu\text{m}$ 。

搭建一套自由空间的望远系统，使用来自

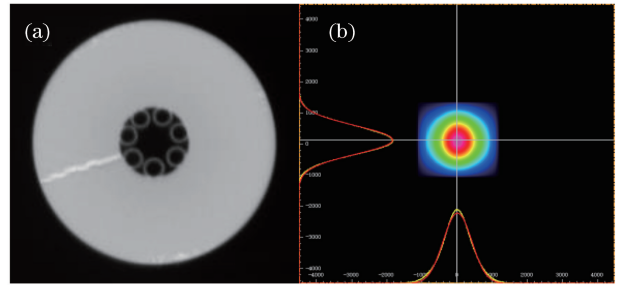


图 2 空芯反谐振光纤。(a) 光纤端面示意图；(b) 光纤模场

Fig. 2 HC-ARF. (a) Schematic fiber cross section; (b) fiber mode field

Thorlabs 公司的光束质量分析仪 (型号: BP209) 分别测量了空芯反谐振光纤、大模场光纤和普通单模光纤的模场直径，分别为 $25.2, 18.47, 9.6 \mu\text{m}$ ，误差为 $\pm 1 \mu\text{m}$ ，与仿真结果一致。大模场光纤的模场更接近 HC-ARF，两者更容易实现模场匹配，耦合损耗较低。此外，实芯光纤之间的熔接技术已经非常成熟，通过后处理和绝热熔接，很容易实现大模场光纤和普通单模光纤的低损耗熔接，所以实验选择纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$ 的大模场光纤作为反谐振光纤和单模光纤间的过渡光纤。

测量耦合损耗使用的是中心波长为 1550 nm 稳定的自发放大辐射 (ASE) 光源，输出功率为 $(13 \pm 0.01) \text{ mW}$ 。使用光敏功率计来测量功率。测得单模光纤和 HC-ARF 直接耦合损耗为 3 dB 。

实验第一步是降低实芯大模场光纤和普通单模光纤之间的熔接损耗，并尽可能避免在实芯大模场光纤中激发高阶模。两者的直接熔接损耗为 0.98 dB 。使用光纤拉锥机将普通单模光纤扫描热扩芯处理 1000 s ，测得模场直径为 $16.38 \mu\text{m}$ ，使用来自 Vytran 公司的光纤熔接机 (型号: GPX-3600) 将处理过的单模光纤一端和大模场光纤熔接。测得熔接损耗约为 0.14 dB 。经过进一步优化，两者的熔接损耗有望小于 0.1 dB ，熔接点如图 3(a) 所示。由于大模场光纤适用于传输高阶模，所以在实验中只使用了很短的一段大模场光纤 (约 6 cm)，以避免产生高阶模。

实验第二步是实现大模场光纤和 HC-ARF 之间的低损耗熔接。将前一步骤中熔接好的单模光纤一端连接 ASE 光源，大模场光纤一端和 HC-ARF 的一段分别固定在熔接机夹具上，HC-ARF 另一端连接功率计。HC-ARF 的长度约为 5 m ，同时弯曲成直径约 0.5 m 的圆圈，以尽可能滤除其中的高阶模成分。调节光纤间距，进行对准，同时监测功率计读数，待功率达到最大时，设置电极偏移量、光纤推

进量和放电参数,放电完成熔接过程。图 3(b)为放电后熔接点图像。测得该熔接点的熔接损耗为 0.704 dB。加上实芯光纤之间的熔接损耗,得到从普通单模光纤到 HC-ARF 总的熔接损耗为 0.844 dB,该结果低于目前报道的 HC-ARF 熔接结果 1 dB^[17]。移动熔接机右马达,将熔点断开,观察到的光纤端面如图 3(c)和(d)所示。由图 3(c)可以看出,两光纤之间实现了很好的对准和熔接,由图 3(d)可以看出,空芯反谐振光纤的毛细管没有明显变形及塌陷。

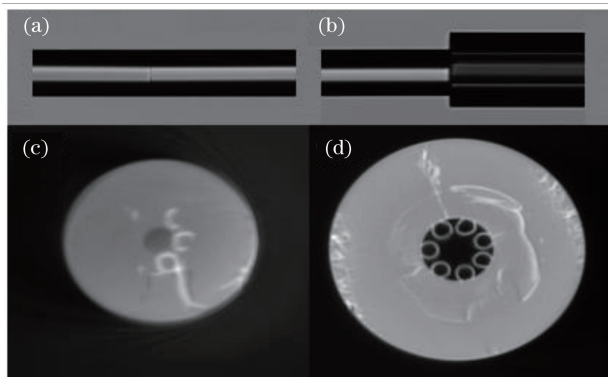


图 3 (a)和(b) 光纤熔接点侧面;(c)和(d) 熔接光纤的横截面视图

Fig. 3 (a) and (b) Side view of spliced fiber points; (c) and (d) cross section of spliced fibers

5 结 论

分析了影响 HC-ARF 熔接损耗的主要因素,通过有限元 Comsol 软件结合 Matlab 软件仿真分析了实芯大模场光纤和 HC-ARF 间耦合损耗。仿真结果给出:当实芯光纤模场直径为 24.21 μm 时,得到耦合损耗最小为 0.207 dB。实验通过引入一段模场匹配的实芯大模场光纤作为过渡光纤,实现了从单模光纤到 HC-ARF 的低损耗耦合。使用特种光纤熔接机自行编辑熔接程序,优化熔接参数,实现了光纤之间低损耗熔接。最终实验得到从单模光纤到 HC-ARF 的最低熔接损耗为 0.844 dB。观察放电后的光纤端面,HC-ARF 的结构没有明显变形及塌陷。

参 考 文 献

- [1] Roberts P, Couny F, Sabert H, *et al.* Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [2] de Matos C, Taylor J, Hansen T, *et al.* All-fiber chirped pulse amplification using highly-dispersive air-core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2832-2837.
- [3] Wheeler N V, Petrovich M N, Slavik R, *et al.* Wide-bandwidth, low-loss, 19-cell hollow core photonic band gap fiber and its potential for low latency data transmission[C]//National Fiber Optic Engineers Conference. Washington: Optical Society of America, 2012: PDP5A. 2.
- [4] Chaudhuri S, van Putten L D, Poletti F, *et al.* Low loss transmission in negative curvature optical fibers with elliptical capillary tubes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4228-4231.
- [5] Poletti F, Petrovich M N, Richardson D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 315-340.
- [6] Benabid F, Roberts P J. Linear and nonlinear optical properties of hollow core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(2): 87-124.
- [7] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, *et al.* Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 279-284.
- [8] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [9] Gao S F, Wang Y Y, Tian C P, *et al.* Splice loss optimization of a photonic bandgap fiber via a high V -number fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(21): 2134-2137.
- [10] Hao J, Liu Y, Li W C, *et al.* Preparation of all-fiber HC-PCF low-pressure gas cell by the He-assisted fusion splicing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906001.
郝军, 刘晔, 李文彩, 等. He 气辅助熔接的全光纤型 HC-PCF 低压气体腔的制备[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0906001.
- [11] Zhang N Q, Qin T L, Wang Z F, *et al.* Low-loss coupling between tapered fibers and anti-resonant hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100608.
张乃千, 秦天令, 王泽锋, 等. 反共振空芯光子晶体光纤与拉锥光纤低损耗耦合[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100608.
- [12] Bourliaguet B, Pare C, Emond F, *et al.* Microstructured fiber splicing[C]. *Optics Express*, 2003, 11(25): 3412-3417.
- [13] Xiao L M, Demokan M S, Jin W, *et al.* Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3563-3574.

-
- [14] Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices [J]. Bell System Technical Journal, 1977, 56(5): 703-718.
- [15] Zheng X M, Debord B, Vincetti L, *et al.* Fusion splice between tapered inhibited coupling hypocycloid-core Kagome fiber and SMF [J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14642-14647.
- [16] Aghaie K Z, Dignonnet M J, Fan S H. Optimization of the splice loss between photonic-bandgap fibers and conventional single-mode fibers [J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 1938-1940.
- [17] Hayes J R, Sandoghchi S R, Bradley T D, *et al.* Antiresonant hollow core fiber with an octave spanning bandwidth for short haul data communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 437-442.