

文章编号: 1001-3806(2011)02-0202-04

光子晶体光纤与普通光纤的耦合熔接

奚小明, 陈子伦, 刘诗尧, 侯静*, 姜宗福

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为了实现光子晶体光纤与普通光纤低损耗熔接, 采用优化熔接机参量和逐渐塌缩光子晶体光纤空气孔的方法, 对光子晶体光纤和普通光纤熔接损耗的主要来源及普通熔接机参量的选择进行了详细的理论分析, 并对光子晶体光纤和普通光纤模场直径相匹配和不匹配两种情况分别进行了熔接实验研究, 取得了小于 0.2 dB 和 0.3 dB 的熔接损耗。结果表明, 通过优化熔接机参量可以实现模场直径相匹配的光子晶体光纤与普通光纤的低损耗熔接, 而模场直径不匹配的情况可以通过逐渐塌缩光子晶体光纤空气孔从而增加光子晶体光纤的模场直径的方法来实现低损耗熔接。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 普通光纤; 熔接损耗; 模场直径

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.017

Coupling and fusion splicing of photonic crystal fibers with conventional fibers

XI Xiao-ming, CHEN Zi-lun, LIU Shi-yao, HOU Jing, JIANG Zong-fu

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

Abstract: In order to realize low loss fusion splicing between photonic crystal fiber (PCFs) and conventional fibers, after optimizing the splicer parameters and gradually decreasing the air hole collapse of PCFs, the main source of fusion splicing loss between PCFs and conventional fibers and rules of choosing parameters of arc fusion splicer were discussed in detail. Then some experiments splicing PCFs and conventional fibers were carried out with matched and mismatched mode field diameters, and very low loss (less than 0.2 dB and 0.3 dB respectively) was obtained. In conclusion, low loss splicing can be achieved by optimizing the splicer parameters for matched mode field diameters, however for much mismatched mode field diameters, low splicing loss can be obtained through controlling air hole collapse of PCFs.

Key words: fiber optics; photonic crystal fiber; conventional fiber; splicing loss; mode field diameter

引言

随着光子晶体光纤的迅速发展, 光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 和普通单模光纤 (single-mode fiber, SMF) 以及光子晶体光纤间的熔接逐渐得到重视^[1-13], 因为熔接与传统的光具组耦合相比具有很多优点: 避免了透镜反射, 紧凑性好, 可靠性高, 对光子晶体光纤起到保护作用, 低的熔接损耗更加凸显了熔接异于光具组耦合的优越性^[6]。由于光子晶体光纤的特殊传导机制由很多的波长量级的空气孔组成, 这种空气孔在熔接的过程中非常容易变形塌缩, 从而导致光子晶体光纤的传导结构破坏, 产生高损耗, 因此, 实现光子晶体光纤的低损耗熔接是一项非常具有

挑战性的工作。

目前人们已经提出了很多的方法来实现光子晶体光纤的低损耗熔接, 利用 CO₂ 激光器^[6-7]、光纤透镜^[8] 或者对光子晶体光纤进行掺杂^[9-11]、做预制棒时就实现连接^[12] 等方法都可以实现光子晶体光纤和普通光纤的低损耗熔接, 但是这些方法都非常复杂, 并且需要特殊的设备或者器件才能实现。利用普通熔接机也可以实现模场直径相匹配的光子晶体光纤和普通光纤的低损耗熔接^[4,13]; 对于模场直径相差大的光子晶体光纤和普通光纤的熔接, ZHANG^[3] 和 XIAO^[13] 等人分别提出了一种采用过渡光纤的方法, 在两光纤之间引入一模场直径适中的过渡光纤, 最终的损耗比直接熔接损耗都有明显的降低。普通光纤熔接机在光子晶体光纤和普通光纤熔接中的使用^[13-14] 使光子晶体光纤的熔接变的简单化、大众化、实用化。但是, 目前国内还没有相关文献详细地介绍普通熔接机在熔接光子晶体光纤时的熔接损耗来源及参量选择原则。作者结合具体的熔接实验, 对普通熔接机在熔接光子晶体光纤时熔接参量选择进行了详细的探讨与分析。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划资助项目 (NCET-08-0142)

作者简介: 奚小明 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: houjing25@sina.com

收稿日期: 2010-05-17; 收到修改稿日期: 2010-05-26

1 熔接损耗分析

普通的电弧熔接机都是用来熔接普通光纤的,整个过程是一个完整的自动化过程。由于普通光纤的熔接技术已经非常成熟,所以熔接损耗都非常小,然而对于光子晶体光纤,同样的操作将会导致非常大的损耗。从物理学的角度看,高损耗的主要原因有两个^[13]:一是光子晶体光纤中空气孔在熔接点附近完全塌缩,由于破坏了光子晶体光纤的传导结构导致熔接点的高损耗;二是所熔接光子晶体光纤和普通光纤的模场失配引入的损耗。

1.1 空气孔塌缩

熔接机在熔接两光纤时,两光纤端被加热熔化后被推压形成一个节点。然而,光子晶体光纤具有小的硅玻璃面积(包层中的空气孔的结构),所以光子晶体的熔化点小于普通光纤的熔化点^[6]。假定光子晶体光纤和普通光纤的热吸收系数相同,空气孔的塌缩速率可表示为^[8,13]:

$$v_{\text{collapse}} = \frac{\gamma}{2\eta} \quad (1)$$

式中, γ 表示表面张力, η 表示粘性。硅玻璃的表面张力对熔接过程中的温度不是很敏感,但是粘性随着温度的升高会迅速下降,因此,孔的塌缩速率将随着温度的升高而加速。如果用熔接普通光纤的参量去熔接光子晶体光纤,由于总的放电能量太高而导致光子晶体光纤空气孔的完全塌缩,光子晶体光纤的导光结构被破坏而引起熔接点的高损耗,所以,在熔接光子晶体光纤时,熔接机的参量选择决定着熔接损耗的大小,优化普通熔接机的参量可以避免空气孔的塌缩,使损耗降到最低。

1.2 模场失配

光子晶体光纤的模场失配损耗可以用下面的公式表示^[7,13]:

$$\alpha = -20 \lg \left(\frac{2w_{\text{PCF}}w_{\text{SMF}}}{w_{\text{PCF}}^2 + w_{\text{SMF}}^2} \right) \quad (2)$$

式中, w_{PCF} 和 w_{SMF} 分别表示光子晶体光纤和普通光纤的模场直径。通过(2)式可以看到,如果两光纤的模场直径相等或者相差很小,模场失配损耗会很小,这样只要选择好熔接机的熔接参量,不使光子晶体光纤的空气孔破坏,熔接的损耗就会很低。然而对于模场直径相差很大的光纤之间的熔接,尽管光子晶体光纤空气孔没有破坏,熔接后的损耗仍然很大,主要是因为两不同光纤的模场直径不匹配所引起的^[1,14]。

2 熔接机的参量选择原则

在光子晶体光纤的熔接过程中,为了避免或者控

制空气孔的塌缩,通常选择小的放电电流和小的放电时间(与普通光纤间的熔接相比),然而,这个合适的能量又能够使光子晶体光纤和普通光纤的熔接点具有一定的强度,不至于很容易断裂,所以在熔接过程中首先需要对这两个参量进行合理选择。光子晶体光纤的熔化点低于普通光纤^[6],因此熔接机电极的位置设置也非常重要^[15-16],放电的电极位置应设置在普通光纤一端,这样可以使光子晶体光纤熔接点的能量小于普通光纤熔接点的能量,如图1所示。这种设置的优点

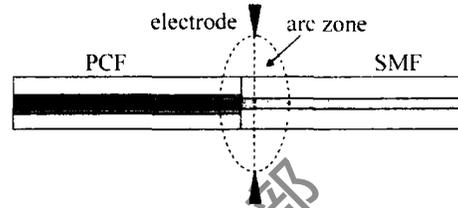


Fig. 1 Splicing SMF to PCF with an offset of the joint to the central axis of arc discharge^[13]

主要有以下两点^[13]:一是光子晶体光纤上的放电能量小,更易于控制光子晶体光纤空气孔的塌缩;二是普通光纤熔接点上具有更多的放电能量,可让普通光纤更好地达到熔化状态,因为普通光纤的熔化点高于光子晶体光纤^[6]。影响熔接损耗的另外一个重要参量是光纤的“重叠”长度,即光子晶体光纤和普通光纤在熔接过程中的重叠长度,小的重叠可能会导致熔接点比较脆弱,甚至根本不能熔接;大的重叠可能会导致熔接点处两光纤弯曲,引起高损耗,因此,在熔接的过程中需要根据不同的光纤选择合适的“重叠”长度。除了上面提到的参量外,重复放电的放电电流和放电时间的合理选择有时对降低熔接损耗和增加熔接点强度也有所帮助^[15]。

上面简单介绍了光子晶体光纤熔接过程中熔接机的几个重要参量,因为不同的光子晶体光纤,相同熔接机优化后的参量会相差很大,同样,相同的光子晶体光纤,熔接机类型的不同,熔接参量也会相差很大,所以在熔接的过程中,要根据具体的光子晶体光纤类型和熔接机类型选择合适的熔接参量。

3 熔接实验结果与分析

实验中所使用的光纤有两种普通光纤和一种光子晶体光纤。普通光纤分别命名为 SMF_1 和 SMF_2 ,980nm下的模场直径对应为 $5.3\mu\text{m}$ 和 $9.5\mu\text{m}$;光子晶体光纤命名为PCF,其横截面电镜扫描照片见图2,空气孔直径为 $3.54\mu\text{m}$,孔间距为 $5.42\mu\text{m}$,纤芯直径为 $7\mu\text{m}$,980nm下模场直径为 $6\mu\text{m}$ 。

实验中熔接点的损耗检测示意图见图3,首先用功率计测量980nm光源经普通光纤后的输出功率,记

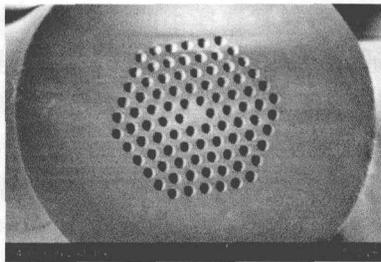


Fig. 2 Scanning electron microscope image for the PCF

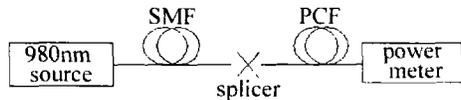
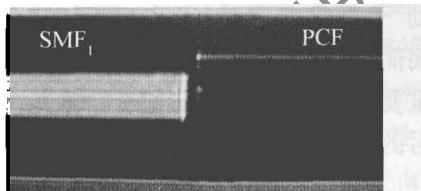


Fig. 3 Experimental setup for the measurement of splice loss

下功率值取出光纤,光子晶体光纤和普通光纤熔接后,把光子晶体光纤的另一端放入功率计,此时,功率计的读数和前面读数之差即为熔接点的损耗,实际上这里所讲的熔接损耗包括熔接点的损耗和光子晶体光纤引入的损耗,由于光子晶体光纤引入的损耗非常小而被忽略。实验中所使用的熔接机为日本腾仓的 FSM-40PM。

3.1 PCF 和 SMF_1 的熔接

光子晶体光纤 PCF 和普通光纤 SMF_1 的模场直径分别为 $6\mu\text{m}$ 和 $5.3\mu\text{m}$,利用(2)式计算得到模场直径不匹配引入的损耗为 0.07dB ,因此,在熔接过程中只要选择好熔接参量,使光子晶体光纤的空气孔不变形就可以获得低的熔接损耗。实验中对熔接参量放电电流、放电时间、电极位置和重叠长度进行了多次尝试,最终参量分别为 4.5mA , 200ms , $4\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ 的情况下,每次的熔接损耗都在 0.2dB 以下,并且熔接点具有足够的强度。熔接后的照片见图 4,从图中可以看

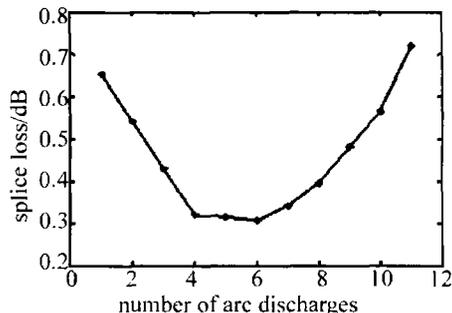
Fig. 4 Optical microscopy image of the fusion joint of PCF/ SMF_1

出,光子晶体光纤的空气孔没有发生变形,又因为两光纤的模场直径相匹配,所以两光纤熔接后的损耗非常小。

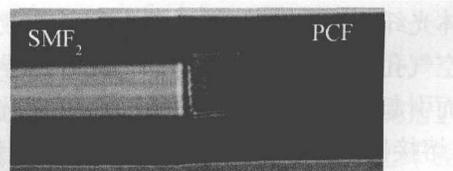
3.2 PCF 和 SMF_2 的熔接

普通光纤 SMF_2 的模场直径 $9.5\mu\text{m}$ 大于光子晶体光纤 PCF 的模场直径 $6\mu\text{m}$,计算得到模场直径的损耗为 0.9dB 。在熔接过程中,可以适当地控制光子晶体光纤的塌缩变形,光子晶体光纤空气孔塌缩变小,可以增加光子晶体光纤的模场直径,从而降低光子晶体光纤和其它大模场直径光纤的熔接损耗^[15,17-18]。在熔接过程中,选择多次放电的方法来实现光子晶体光纤的

逐渐塌缩变形,通过多次实验,最佳的熔接参量分别为放电电流 9mA 、放电时间 250ms 、电极位置 $4\mu\text{m}$ 和重叠长度 $1\mu\text{m}$,重复放电的电流、时间和第 1 次放电电流、时间相同。熔接次数和熔接损耗的关系见图 5,

Fig. 5 Splice losses of SMF_1 / PCF as a function of the number of arc discharges

可以看出,随着熔接次数的增多光子晶体光纤的空气孔逐渐塌缩,光子晶体光纤的模场直径逐渐增加,两光纤的模场失配逐渐减小,所以,光子晶体光纤和普通光纤 SMF_2 的熔接损耗逐渐降低,在重复放电大约 6 次后达到熔接最小值 0.3dB 。之后随着熔接次数的进一步增多,熔接损耗逐渐变大,这是因为光子晶体光纤的空气孔继续塌缩变小,模场直径继续增大并超过普通光纤的模场直径,模场失配逐渐严重,从而熔接损耗逐渐增大。重复放电 6 次后,光子晶体光纤和普通光纤熔接点损耗为 0.3dB 时的显微镜照片见图 6,可以看出,光

Fig. 6 Optical microscopy image of the fusion joint of PCF/SMF_2 (0.3dB) 子晶体光纤的空气孔有了明显的塌缩,降低了模场失配引入的损耗。

4 结论

作者对光子晶体光纤和普通光纤的熔接进行了详细的研究。首先分析了光子晶体光纤和普通光纤的熔接损耗来源;接着讨论了利用普通熔接机熔接光子晶体光纤时的参量选择原则;最后实验研究了光子晶体光纤和普通光纤的熔接,在模场直径相匹配的时候,通过选择合适的熔接参量使空气孔塌缩降到最小从而实现低损耗熔接,而对于模场直径不匹配的光子晶体光纤和普通光纤的熔接,可以通过多次放电来控制空气孔的塌缩,从而增大光子晶体光纤的模场直径,使模场失配降低,实现低损耗熔接。对于进一步减小熔接损耗,可以从提高光纤端面的切割与保护、纤芯的严格对准等等方面进行考虑;模场不匹配的情况,还可以小范围微调放电电流和放电时间,甚至改变电极放电加热

区域形状,最终达到全光纤光子晶体光纤激光运转的低损耗需求。

参 考 文 献

- [1] WANG R X. Numerical study on the coupling of the photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*,2007,31(5):493-495(in Chinese).
- [2] WANG R X. Numerical study of splice loss of high-nonlinearity photonic crystal fibers[J]. *Laser Technology*,2008,32(3):302-304(in Chinese).
- [3] ZHANG W, ZHANG L, CHEN Sh, *et al.* Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(10): 1389-1392(in Chinese).
- [4] GUO T Y, LOU Sh Q, LI H L, *et al.* Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 511-516(in Chinese).
- [5] YEUK L H, WEI J, JIAN J, *et al.* Loss analysis of single-mode fiber/photo-crystal fiber splice [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*,2004,40(5):378-380.
- [6] CHONG J H, RAO M K, ZHU Y, *et al.* An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO₂ laser [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*,2003,15(7):942-944.
- [7] CHONG J H, RAO M K. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2003, 11(12): 1366-1370.
- [8] YABLON A D, BISE R T. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splices using GRIN fiber lenses [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*,2005,17(1):118-120.
- [9] NAKAJIMA K, HOGARI K, ZHOU J, *et al.* Hole assisted fiber design for small bending and splice losses [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*,2003,15(12):1737-1739.
- [10] KERBAGE C, HALE A, YABLON A, *et al.* Integrated all-fiber variable attenuator based on hybrid microstructure fiber [J]. *Applied Physics Letters*,2001,79(19):3191-3193.
- [11] WANG Y P, BARTELT H, BRUECKNER S, *et al.* Splicing Gedoped photonic crystal fibers using commercial fusion splicer with default discharge parameters [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7258-7263.
- [12] LEON-SAVAL S G, BIRKS T A, JOLY N Y, *et al.* Splice-free interfacing of photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1629-1631.
- [13] XIAO L, 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):3563-3568.
- [14] BOURLIAGUET B, PARÉ C, ÉMOND F, *et al.* Microstructured fiber splicing [J]. *Optics Express*, 2003, 11(25): 3412-3417.
- [15] XIAO L, JIN W, DEMOKAN M S. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges [J]. *Optics Letters*,2007,32(2):115-117.
- [16] FRAZAO O, CARVALHO J P, SALGADO H M. Low-loss splice in a microstructured fibre using a conventional fusion splicer [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*,2005, 46(2):105-109.
- [17] LAGSGAARD J, BJARKLEV A. Reduction of coupling loss to photonic crystal fibers by controlled hole collapse: a numerical study [J]. *Optics Communications*,2004,23(7):431-435.
- [18] WANG Y B, CHEN Z L, HOU J, *et al.* Effectively increasing mode field diameter of photonic crystal fibers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2010,22(7):1491-1494(in Chinese).

(上接第201页)

个电路模块、一个系统)分成外部(即端口)和内部(即设计实体的内部功能和算法)。丰富的仿真语言和库函数,在大规模集成电路设计的早期就能查验出设计系统的功能可行性,可随时对设计进行功能仿真、时序仿真,设计初期就可以对整个工程设计的可行性作出决策,缩短了设计周期。

从理论上分析验证,本方法可以实现分辨率为 $\frac{11\lambda}{1000}$ 的纳米位移测量。在以后的实验过程中,通过对 FPGA 中的 DCM 设置不同的频率改变插入脉冲频率,可以尝试更高频率,如 150MHz, 200MHz, 250MHz, 300MHz, 而分辨率为 $\frac{11\lambda}{1500}, \frac{11\lambda}{2000}, \frac{11\lambda}{2500}, \frac{11\lambda}{3000}$, 将分别进行实验验证。

参 考 文 献

- [1] DAI G L. The study on dual-frequency laser interferometer for nanometrology [D]. Beijing: Department of Precision Instruments and Mechanology of Tsinghua University, 1998: 1-168 (in Chinese).
- [2] CHEN B Y, LI D C. Challenges and opportunities of nanomeasurement technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(5): 547-550 (in Chinese).
- [3] XIE Y, WU Y Z. Zeeman laser interferometer errors for high-precision measurement [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(7): 881-884.
- [4] YANG T B, LUO X, LI D C. Dynamic data collection method of heterodyne interferometer based on FPGA [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 114-116 (in Chinese).
- [5] ZHAO Y, LI D C. Heterodyne interferometer signal processing method based on phase and phase integer measurement [J]. *Acta Metrological Sinica*, 1995, 16(1): 31-36 (in Chinese).
- [6] ZHANG C M, ZHAO Y, LI D C. Application of filling pulse method to phase detection of uncommon-frequency signal [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2000, 27(3): 40-43 (in Chinese).
- [7] OLDHAM N M, KRAMAR J A, HETRICK P S, *et al.* Electronic limitations in phase meters for heterodyne interferometry [J]. *Precision Engineering*, 1993, 15(3): 173-179.
- [8] NICOLI J A G. Multiperiodical phasemeter: US, 4157500 [P]. 1979-06-05.
- [9] MIYAZAKI Ch, AKATSU T, MORI S, *et al.* A laser measurement system for fast and precise positioning [J]. *JSME International Journal*, 1990, 33(1): 49-54.
- [10] WU Ch M. Heterodyne interferometric system with subnanometer accuracy for measurement of straightness [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(19): 3812-3816.