

基于空气孔填充的光子晶体光纤与普通单模光纤低损耗耦合研究

张 静 姜海明 谢 康 王二垒

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 提出一种基于空气孔填充的光子晶体光纤与普通单模光纤低损耗耦合方法,并通过光束传播法数值仿真的方式研究了填充物折射率以及填充长度等参数对耦合损耗的影响。结果表明,选择合适的填充参数可以大幅度降低光子晶体光纤与普通单模光纤间的耦合损耗,从而实现光子晶体光纤与普通单模光纤间的低损耗耦合。该方法可适用于多种光子晶体光纤与普通单模光纤之间的低损耗耦合,在光子晶体光纤与普通单模光纤的模场严重失配的情况下,该方法的优势更为明显。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;数值仿真;填充;耦合;单模光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0406006

Low-Loss Coupling Between Photonic Crystal Fibers and Standard Single-Mode Fibers Based on Air Holes Filling

Zhang Jing Jiang Haiming Xie Kang Wang Erlei

*School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei, Anhui 230009, China*

Abstract A low-loss coupling between photonic crystal fibers and standard single-mode fibers based on air holes filling is proposed. The impacts of filling parameters on coupling loss between the two kinds of fibers is investigated by numerical simulations via beam propagation method. The results show that this method can greatly reduce the coupling loss between two kinds of fibers provided the filling parameters are selected appropriately. This method is usable for the coupling between a variety of photonic crystal fibers and single mode fibers especially for those with large mismatch of mode field diameters.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; numerical simulation; filling; coupling; single mode fiber

OCIS codes 060.5295; 060.2310; 060.2430; 060.2330

1 引 言

光子晶体光纤(PCF),又称为多孔光纤(HF)^[1]或者微结构光纤(MOF),其具有周期性排列的空气孔结构,结构灵活可变^[2-3]。与传统光纤相比,其具有色散可调^[4],非线性特性可调^[5],可以实现无休止单模特性^[6]等优点,可以用于超连续谱产生^[7]、光孤子通信^[8]等领域,已经成为研究的热点^[9-10]。PCF与普通单模光纤(SMF)的低损耗熔接技术是PCF走向实用化的一个关键技术问题^[11]。因此,如何实现PCF与普通单模光纤的低损耗熔接成为近年来的研究热点之一。

1999年,Bennett等^[12]熔接了PCF和SMF,其后国内外学者提出了多种关于两类光纤的熔接方法,如PCF

收稿日期: 2014-09-12; 收到修改稿日期: 2014-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(60588502,60607005,60877033)

作者简介: 张静(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信、光子晶体光纤及其耦合技术方面的研究。

E-mail: zhang_jing89@126.com

导师简介: 姜海明(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光电器件等方面的研究。

E-mail: hmjiang@hfut.edu.cn(通信联系人)

空气孔塌缩^[13-15],加入过渡光纤^[16],对PCF进行拉锥^[17]等。这些方法都存在着一定的缺陷,如PCF塌缩空气孔法,比较难于精确控制空气孔的塌缩程度;加入过渡光纤,一般会引入两次以上的耦合,导致总熔接损耗较高;对PCF进行拉锥,则容易破坏PCF的结构^[18]。

为了有效降低两种光纤的耦合损耗,本文提出一种低损耗耦合方案,即先对一小段PCF进行选择性填充,再使其与SMF进行耦合。采用光束传播法研究发现,通过选取合适的填充参数,可使PCF与SMF的耦合损耗大幅度降低,该方案可适用于多种不同规格的PCF与SMF之间的耦合,即使在PCF与SMF模场严重失配的情况下也能取得较好的耦合效果。

2 PCF与SMF的低损耗耦合

2.1 光纤参数

本文研究所采用的几种光纤参数如表1和2所示,两种PCF分别记为PCF1和PCF2,两种SMF分别记为SMF1和SMF2。

表1 PCF参数,包含1550 nm波段的模场直径

Table 1 PCF parameters, including mode field diameters (MFD) at 1550 nm

Fiber	Cladding / μm	Hole pitch / μm	Hole diameter / μm	MFD / μm
PCF1	125	3.35	2.05	4
PCF2	125	2.5	1.8	2.4

表2 SMF参数,包含1550 nm波段的模场直径

Table 2 SMF parameters, including MFD at 1550 nm

Fiber	Cladding / μm	Core diameter / μm	MFD / μm
SMF1	125	8.2	10.4
SMF2	125	5	8.5

根据传统光纤理论,光纤之间的连接损耗受模场匹配、横向偏移、轴向倾斜等因素影响,其耦合损耗可表示为^[11]

$$\alpha = -10 \lg \left[\left(\frac{2\omega_{\text{PCF}}\omega_{\text{SMF}}}{\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2} \right)^2 \times \exp \left(\frac{-2u^2}{\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2} \right) \times \exp \left(\frac{-k_0^2 n_{\text{SiO}_2}^2 \theta^2 \omega_{\text{PCF}}^2 \omega_{\text{SMF}}^2}{\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2} \right) \right], \quad (1)$$

式中 ω_{PCF} 和 ω_{SMF} 分别表示PCF和SMF的模场半径, u 为横向偏移量, θ 为轴向的倾斜角度, k_0 为自由空间波数, n_{SiO_2} 为二氧化硅的折射率。

2.2 空气孔填充

由表1和表2可见,SMF1的模场直径为10.4 μm ,远大于PCF2的模场直径2.4 μm ,如果光直接从SMF进入PCF,由(1)式计算得到的耦合损耗高达7.17 dB。要降低两者间耦合损耗,就要使两种光纤的模场尽可能地匹配^[16]。为达到此目的,本文提出在如图1(a)所示的PCF2结构中,把靠中心的一层空气孔填充以一定折射率的物质,结果如图1(b)所示;或把靠中心的两层空气孔填充以一定折射率的物质,结果如图1(c)所示,

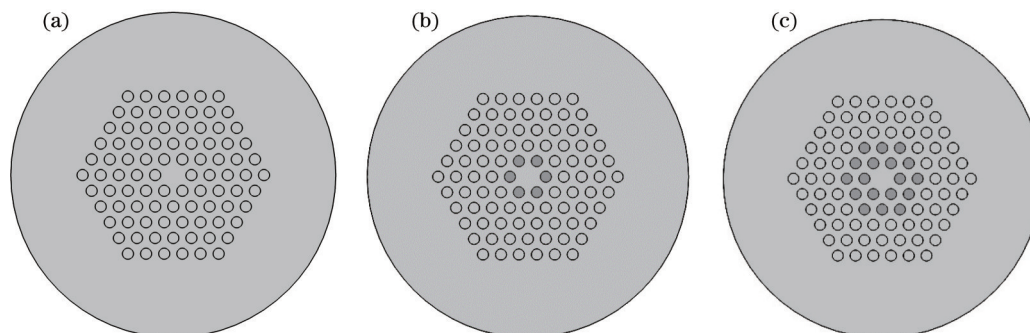


图1 (a) PCF结构示意图; (b)填充靠中心一层空气孔; (c)填充靠中心两层空气孔

Fig.1 (a) Schematic of PCF; (b) one layer of air holes around the center is filled; (c) two layers of air holes around the center are filled

这样就会使PCF2的模场扩大,从而有利于降低两种光纤的耦合损耗,选取合适的填充参数可使二者间的耦合损耗达到较小的值。

2.3 数值仿真模型

仿真模型如图2所示,光源位于SMF左端,光波首先通过SMF,然后耦合到PCF填充部分,最后进入PCF非填充部分;图2上端为PCF填充部分的横截面示意图。本文选取填充方案为:对PCF进行填充,靠中心第一层空气孔填充物折射率为 n_1 ,填充长度为 L_1 ;靠中心第二层空气孔填充物折射率为 n_2 ,填充长度为 L_2 。先通过扫描 n_1 和 n_2 ,对 n_1 和 n_2 选取合适的值使由SMF到PCF填充部分的损耗取得一个较小的值。然后选取合适的填充长度 L_1 和 L_2 ,使SMF与PCF耦合的总损耗达到最小值。

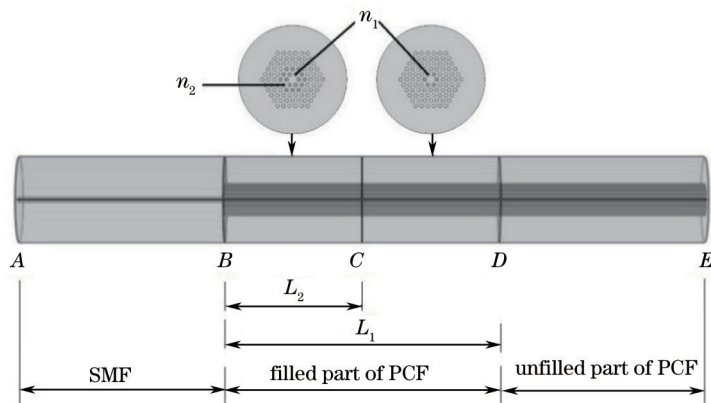


图2 数值计算模型示意图

Fig.2 Schematic of numerical simulaton model

3 结果分析

对PCF进行了选择性填充后,光进入PCF填充部分时会产生多个可稳定传输的模式,模式之间相互耦合,其模场大小随传播长度呈现振荡的形态。图3为光进入图2中BC段后,MFD及AD段的损耗随填充长度 L_2 的变化图。由此可见,MFD及AD段的损耗随 L_2 大致呈周期性变化,二者变化趋势一致,其原因在于耦合损耗主要受模场匹配程度的影响。选取其中一个MFD取得最小值时对应的填充长度便可确定 L_2 的最佳值。图4为光进入图2中CD段后,MFD及总损耗随填充长度 L_1 的变化图,可以看出MFD及总损耗随 L_1 也周期性变化。同理,选取其中一个MFD取得最小值时对应的填充长度便可确定 L_1 的最佳值。另外,对于 L_1 和 L_2 ,系统具有一定的误差承受能力,当填充长度误差不大时,对损耗影响不大。

有了上述参数,便可仿真出光波在耦合系统内的传输情况,并且可知:

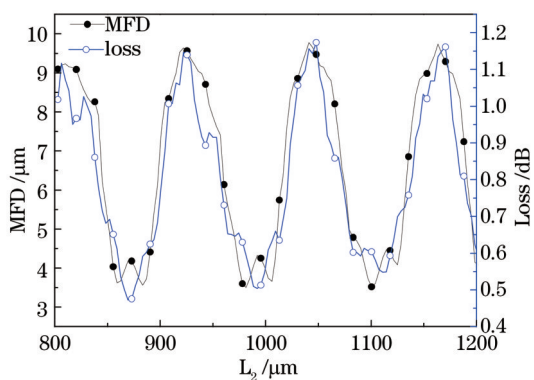


图3 BC段MFD及AD段的损耗随填充长度 L_2 变化关系

Fig.3 MFD on BC and the loss of AD as a function of filling length L_2

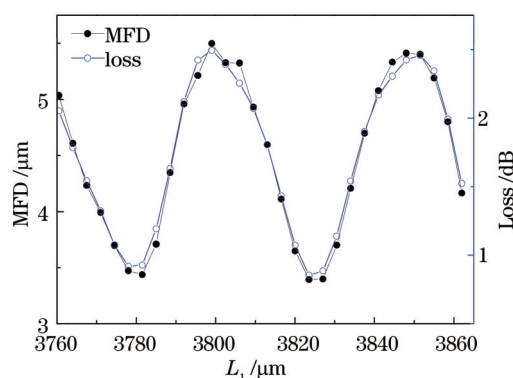


图4 CD段MFD及总损耗随填充长度 L_1 变化关系

Fig.4 MFD on CD and the total loss as a function of filling length L_1

$$f_{\text{loss}} = -10 \lg \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right), \quad (2)$$

计算出 SMF1 与 PCF2 的总耦合损耗 $f_{\text{loss}}=0.85$ dB。这里, P_{in} 为图 2 中 A 端入射归一化光功率, $P_{\text{in}}=1$, P_{out} 为图 2 中 E 端出射光功率。采用类似的过程,便可对其他 SMF 与 PCF 的耦合情况进行数值仿真分析。多个数值仿真参数及结果如表 3 所示。表 3 中最后一行为文献[19]对同样规格光纤耦合所取得的结果,容易看出,除第 3 种情况 SMF2-PCF1 外,本方法的结果明显优于文献[19]所取得的结果,尤其是在模场严重失配的 SMF 和 PCF 间的耦合情况,本方法的优点更为明显。

表 3 数值仿真结果

Table 3 Results of numerical simulation

	SMF1-PCF1	SMF1-PCF2	SMF2-PCF1	SMF2-PCF2
n_1	1.404	1.404	1.374	1.374
n_2	1.404	1.404	1.404	1.374
$L_1 / \mu\text{m}$	4027	3826	4013	3498
$L_2 / \mu\text{m}$	1110	981	1507	3498
Loss of numerical simulation /dB	0.57	0.85	0.46	0.82
Loss of Ref.[19] /dB	0.64	5.37	0.24	2.63

还需指出,关于 PCF 的填充方法已经成熟,比如 De Matos 等^[20]成功地在一根 PCF 中填充了两种不同液体,国内周文远等^[21]提出了具有可操作性的选择性填充 PCF 方法,只要找到合适的材料,选择性填充 PCF 方案是可以实现的。

4 结 论

通过将 PCF 进行空气孔填充的方法对 PCF 与普通单模光纤进行的耦合损耗进行了研究,通过选择合适的填充物、填充模式以及填充长度,该方法可以明显降低 PCF 与 SMF 的耦合损耗。选择合适的填充参数,该方法可适用于多种不同规格的 PCF 与 SMF 耦合,即使在 PCF 与 SMF 模场严重失配的情况下也能取得较好的效果,为 SMF 与 PCF 间的低损耗耦合提供了一种新的实现方案。

参 考 文 献

- 1 T M Monro, D J Richardson, N G R Broderick. Holey optical fibers: an efficient modal model [J]. *Lightwave Technol*, 1999, 17(6): 1093-1102.
- 2 Ning Xiangping, Zhao Chunliu, Lang Tingting, *et al.*. Photonic crystal fiber polarizer based on coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060601.
宁向平, 赵春柳, 郎婷婷, 等. 基于谐振耦合原理的光子晶体光纤偏振器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060601.
- 3 Sun Bing, Chen Mingyang, Qian Chunlin, *et al.*. Design of a broadband directional coupler based on an asymmetric three-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706010.
孙 兵, 陈明阳, 钱春霖, 等. 基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706010.
- 4 J C Knight, J Arriaga, T A Birks, *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(7): 807-809.
- 5 N G R Broderick, T M Monro, P J Bennett, *et al.*. Nonlinearity in holy optical fibers: measurement and future opportunities [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(20): 1395-1397.
- 6 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(13): 961-963.
- 7 R F Cregan, B J Mangan, J C Knight, *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- 8 B R Washburn, S E Ralph, P A Lacourt, *et al.*. Tunable near-infrared femtosecond soliton generation in photonic crystal fibres [J]. *Electron Lett*, 2001, 37(25): 1510-1512.
- 9 Zhang Lu. Low-loss lens-coupling technique on photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106006.
张 璐. 光子晶体光纤的低损耗透镜耦合技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106006.

- 10 Geng Kaisheng, Guan Jianfei. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber with rectangular lattice [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305007.
耿开胜, 关建飞. 矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305007.
- 11 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.
- 12 P J Bennett, T M Monro, D J Richardson. Toward practical holey fiber technology: Fabrication, splicing, modeling and characterization [J]. Opt Lett, 1999, 24(17): 1203-1205.
- 13 Zhang Chengdong, Zhou Xuanfeng, Chen Zilun, *et al.*. Low loss fusion splicing for seven-core photonic crystal fiber by selected air hole collapse technique [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1005004.
张成栋, 周旋风, 陈子伦, 等. 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[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1005004.
- 14 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.
- 15 Z Chen, X Xi, W Zhang, *et al.*. Low-loss fusion splicing photonic crystal fibers and double cladding fibers by controlled hole collapse and tapering [J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(24): 3744-3747.
- 16 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.
- 17 H Hasegawa, M Kikegawa, M Yoshida, *et al.*. Observation of optimum air-hole tapering of splicing between conventional fiber and photonic crystal fiber and analysis of reduction in Fresnel reflection [C]. CLEO IEEE, 2005. 590-591.
- 18 R Wiley, B Clark. High-power, fused assemblies enabled by advances in fiber-processing technologies [C]. SPIE, 2011, 7914: 79140F.
- 19 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.
- 20 C J S De Matos, C M B Cordeiro, E M Dos Santos, *et al.*. Liquid-core, liquid-cladding photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2007, 15(18): 11207-11212.
- 21 周文远, 李志莉, 刘艳格, 等. 选择性填充光子晶体光纤方法: 中国, CN103278883A[P]. [2013-09-04].

栏目编辑: 何卓铭