

# 光子晶体光纤熔接损耗的理论和实验研究

徐中南 陈子伦 奚小明 侯 静 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 理论和实验研究了光子晶体光纤之间的熔接损耗。采用有限元法(FEM)结合完美匹配层(PML),对包层为三角形栅格结构的 2 根相同的光子晶体光纤(PCF)之间的熔接损耗进行了理论计算分析。结果表明,当 2 根光纤的光轴对准时,固定其中一根光纤,绕光轴旋转另一根光纤会导致模场失配,从而产生旋转损耗。旋转损耗随旋转角度周期振荡,且与空气孔直径相比,孔间距对旋转损耗的影响较大。优化选择熔接机参数,避免空气孔塌缩和熔接点处产生气泡,实验测量了这 2 根相同光子晶体光纤之间熔接后的最大和最小光功率输出,得到其熔接损耗差与理论计算得到的最大旋转损耗一致。实验进一步降低了光子晶体光纤之间的熔接损耗。

**关键词** 光纤光学;光子晶体光纤;熔接损耗;旋转损耗;有限元;光纤熔接机

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100209

## Theoretical and Experimental Research on Splice Losses of Photonic Crystal Fibers

Xu Zhongnan Chen Zilun Xi Xiaoming Hou Jing Liu Zejin

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

**Abstract** The splice losses of photonic crystal fibers (PCFs) are theoretically and experimentally studied. For the two same PCFs with the triangular lattice, the splice losses are theoretically investigated by using finite element method (FEM) with perfectly matched layer (PML). The results show that the fundamental mode field mismatch induces the rotation losses with rotating one of the two PCFs when two optical axes are coincident. The rotation losses oscillate with increasing rotation angle, and the pitch between two nearest air holes has greater impact on the rotation losses than the air hole diameter. Optimizing the parameters of the arc fiber splicer, avoiding the air hole collapse and bubble generation, the rotation losses are experimentally investigated for two same PCFs. The measured rotation loss is coincident with the simulation results. Experiments can further reduce the splice losses of PCFs.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; splice loss; rotation loss; finite element method; fiber splicer

**OCIS codes** 060.1155; 060.2310; 060.5295

## 1 引 言

目前光子晶体光纤(PCF)由于其独特的光学特性,例如无限截止单模<sup>[1]</sup>、可调节色散<sup>[2]</sup>、高非线性<sup>[3]</sup>以及设计灵活等特性,已经引起广泛的关注。光子晶体光纤根据其导光原理分为折射率导引型和带隙型光纤,其中折射率导引型光子晶体光纤最为常见,在光纤及光纤传感等领域得到广泛应用。

光子晶体光纤在实际应用中通常需要与其他光纤连接后使用,由此会产生连接损耗。导致连接损

耗的主要因素有模场失配、光轴倾斜和光轴偏移<sup>[4]</sup>。光纤熔接是连接光纤的有效方法之一,目前已经实现了利用商用电弧光纤熔接机<sup>[5,6]</sup>或 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[7]</sup>熔接光纤。与常规光纤不同,空气孔塌陷是光子晶体光纤熔接过程中最受关注的因素。针对模场失配问题,实验和理论已经研究了光子晶体光纤与单模光纤之间的低损熔接<sup>[8]</sup>。随着光子晶体光纤应用研究的深入,光子晶体光纤之间的低损熔接成为一个研究难点。实验初步研究了包层为三角形栅格结构

收稿日期: 2011-01-30; 收到修改稿日期: 2011-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61007037)资助课题。

作者简介: 徐中南(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤及光纤器件等方面的研究。E-mail: xzn132227@163.com

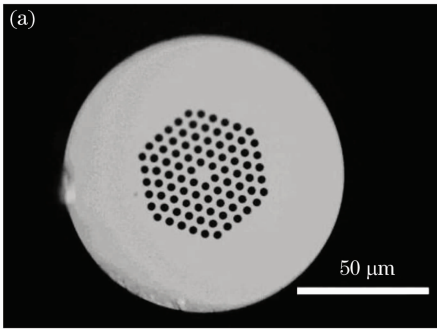
导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

的 2 根光子晶体光纤之间的熔接损耗,发现与光子晶体光纤和常规光纤之间的熔接损耗相比光子晶体光纤之间的熔接损耗对熔接参数的选取更为敏感<sup>[9]</sup>,但文献<sup>[9]</sup>只从实验上研究了 2 根相同光子晶体光纤之间的熔接损耗,没有系统地研究因光纤绕轴旋转导致的旋转损耗。

本研究从理论和实验上分析了光子晶体光纤之间因为光纤绕轴旋转导致模场失配产生的旋转损耗。首先利用有限元法,结合环形完美匹配层(PML)<sup>[10,11]</sup>,计算分析了 2 根相同光子晶体光纤的熔接损耗,即将 2 根光纤的光轴对准,然后绕光轴旋转光纤并计算得到不同旋转角度对应的旋转损耗。计算分析了孔直径和孔间距的误差对旋转损耗的影响。优化选择熔接机参数,将 2 根相同的光子晶体光纤置入商用电弧光纤熔接机中,调节熔接机一侧光纤头夹具寻找最大或最小光功率输出,然后熔接光纤并测量得到旋转损耗,其实验结果与理论计算结果一致。

## 2 数值模拟

光子晶体光纤微结构的非圆对称使得无法使用



常规光纤的熔接损耗公式进行理论分析,因此模场失配导致的光子晶体光纤之间熔接损耗  $\alpha$  可以通过两根光纤的场交叠积分来计算<sup>[12,13]</sup>

$$\alpha = -10 \lg \left| \frac{\iint E_p \cdot E_s dx dy}{\sqrt{\iint |E_p|^2 dx dy} \sqrt{\iint |E_s|^2 dx dy}} \right|^2, \quad (1)$$

式中  $E_p$  和  $E_s$  分别为 2 根光子晶体光纤端面上的横向电场分布,该电场分布利用有限元法计算得到。为提高计算精度,在计算区域外使用 PML 用于完全吸收由光纤辐射出的电磁场。通常完美匹配边界为矩形框结构,但对结构具有对称性的光子晶体光纤,环形完美匹配边界不仅与前者吸收效果相同,而且结构更简单,使用简便。

实验中采用的光子晶体光纤的包层具有三角形栅格结构,孔直径  $d = 3.2 \mu\text{m}$ ,孔间距  $\Lambda$  有  $d/\Lambda = 0.54$ ,通过缺失中心空气孔引入缺陷构成光纤纤芯,其横向结构的显微镜照片如图 1(a)所示。与普通单模光纤相比,光子晶体光纤的微结构导致其模场分布不再呈圆对称分布,如图 1(b)所示。

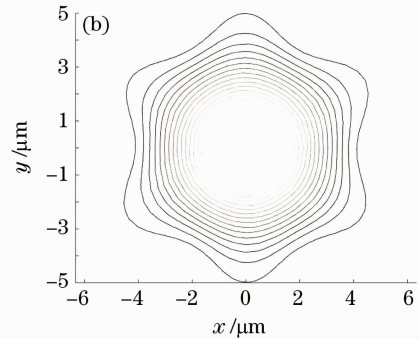


图 1 实验用光子晶体光纤的结构和基模场分布。(a)显微镜照片,(b)模拟的基模场横向电场分布

Fig. 1 Structure and fundamental mode distribution of the experimental PCF. (a) micrograph of the transverse structure of the PCF, (b) simulated transverse mode field distribution

理想条件下,相同的 2 根光子晶体光纤在端面结构完全重合时(忽略端面菲涅耳反射等因素)连接损耗为 0。固定其中一根光纤,绕光轴旋转另一根光纤导致两侧模场分布不再匹配并引入损耗,该损耗定义为旋转损耗<sup>[14]</sup>。利用(1)式计算得到该参数下 2 根相同的光子晶体光纤之间的旋转损耗与旋转角的对应关系如图 2 和图 3 所示。

图 2 和图 3 包括了孔间距和孔直径误差分别为 0 和  $\pm 10\%$  时的旋转损耗曲线。由图 2 可见,当 2 根光纤端面完全重合时,其旋转损耗为 0,随着旋转角度

的增加,旋转损耗逐渐增大,其角度达到  $30^\circ$  时,旋转损耗达到最大值 0.16 dB。当孔间距有  $\pm 10\%$  的误差时,旋转损耗最大值的偏移量约为  $\pm 0.03$  dB。由图 3 可见,孔直径有  $\pm 10\%$  的误差和无误差时相比,其旋转损耗基本一致。可见孔直径的误差对旋转损耗的影响较小。在实际熔接过程中,熔接机参数选择不当会导致空气孔塌缩,由此导致空气孔变小且孔间距减小,因而旋转损耗最大值降低,但由于该光子晶体光纤的纤芯无掺杂,因而端面散射等因素对熔接损耗的影响会显著增强。

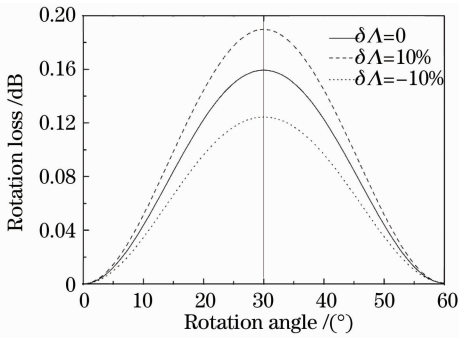


图2 孔间距误差  $\delta\Lambda$  为 0 和  $\pm 10\%$  时旋转损耗与旋转角的关系

Fig. 2 Relationship between rotation loss and rotation angle with  $\delta\Lambda$  being 0 and  $\pm 10\%$

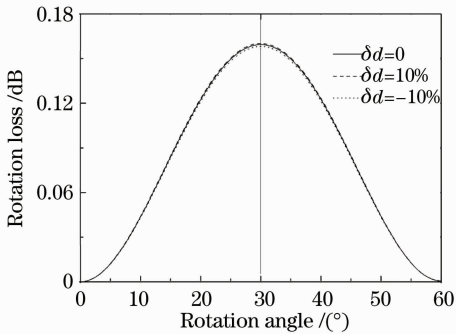


图3 孔直径误差  $\delta d$  为 0 和  $\pm 10\%$  时旋转损耗与旋转角的关系

Fig. 3 Relationship between rotation loss and rotation angle with  $\delta d$  being 0 and  $\pm 10\%$

### 3 实验结果与分析

实验采用可以用于熔接保偏光纤的 Fujikura FSM-40PM 电弧光纤熔接机,其一端的光纤头夹具可以手动调节,从而满足光子晶体光纤之间不同的模场匹配条件。实验装置如图 4 所示,首先将 1550 nm 波长的半导体激光器的尾纤(单模光纤)与被测光子晶体光纤熔接,测量光子晶体光纤另一端的输出光功率,然后将该根光子晶体光纤截断为 2 部分,对其端面切割和洁净处理后再次熔接,测量第 2 次的输出光功率,根据 2 次测量结果即可得到这 2 段光子晶体光纤之间的熔接损耗。实验使用的光子晶体光纤的长

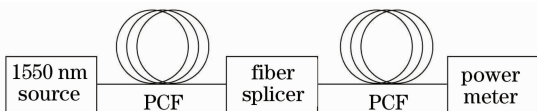


图4 光子晶体光纤熔接实验结构图

Fig. 4 Experiment setup for splice loss measurement of PCFs

度约为 2 m,因而约束损耗可以忽略不计,即实验测量所得的损耗为光子晶体光纤之间的熔接损耗。

实验可能导致损耗增加的主要因素是孔塌缩,这种情况可以导致 2 个结果:1)熔接点处波导结构被破坏;2)即使 2 根结构相同的光子晶体光纤的端面结构完全对准,熔接点两侧光纤孔塌陷不一致也会导致模场失配。为了尽量减小实验中其它因素对熔接损耗的影响,熔接前应尽量降低光纤端面的切割角,并对其切割端面进行洁净处理后再进行放电熔接。为避免该结构的光子晶体光纤的空气孔塌缩,经优化后选择熔接机的熔接电流为 14 mA,放电时间为 220 ms,并选择单次放电熔接。图 5 为光子晶体光纤熔接点处的显微镜照片。由图可见熔接点处透光均匀,熔接点处 2 根光子晶体光纤的端面均保持平整,未出现空气孔塌缩,也无气泡产生。在熔接点处截断并观测熔接点处端面的形貌,如图 6 所示,光子晶体光纤包层的空气孔在熔接后基本保持完好,没有明显的塌缩。因而选择该熔接参数可以用于研究光子晶体光纤之间的旋转损耗。

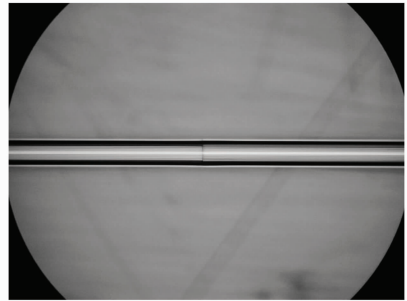


图5 光子晶体光纤熔接点处的形貌

Fig. 5 Micrograph of the splice joint of the PCFs

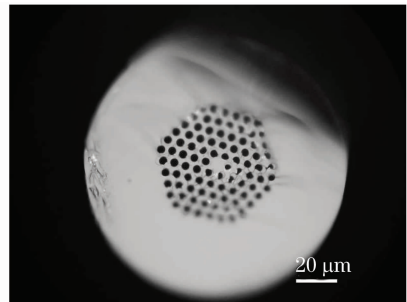


图6 光子晶体光纤熔接点处截面的显微镜照片

Fig. 6 Micrograph of the transverse structure of the PCFs at the splice joint

实验采用截断法测量光子晶体光纤之间的旋转损耗。首先测量该光子晶体光纤的输出光功率,然后将该光子晶体光纤由中间截断,对端面处理后,将其置于光纤熔接机夹具中,手动调节熔接机一侧的

光纤头夹具,寻找到最大或最小输出光功率,放电熔接后将光纤移出熔接机并测量输出光功率。采用该方法对最大和最小输出光功率分别测量 5 次,得到其光功率透射率如表 1 所示。

表 1 实验测量的最大和最小光功率透射率

Table 1 Maximum and minimum transmittance measured in the experiment

List	Maximum transmittance/%	Minimum transmittance/%
1	98.20	95.60
2	98.40	94.20
3	98.00	94.60
4	98.60	95.20
5	99.40	94.80
Average	98.52	94.88

实验使用的熔接机虽然可以手动旋转调节光纤头夹具的旋转角,但无法精确测量其旋转角度,因而实验只测量了最大和最小输出光功率。在熔接前手动旋转夹具的过程中可以观察到输出光功率的变化过程。实验分别测量了 5 次最大和最小的输出光功率。其中最大平均透射率为 98.52%,最小平均透射率为 94.88%,其差值为 3.64%,与理论计算得到的最大旋转损耗(0.16 dB,对应光功率透射率差为 3.60%)一致。表 1 中实验数据呈离散分布,其原因在于每次切割后,光纤端面的倾角有微小差异,这对熔接损耗有一定影响。

## 4 结 论

对光子晶体光纤之间的熔接损耗机制进行了理论和实验研究。理论计算显示当 2 根相同的光子晶体光纤的光轴对准时,端面的横向基模场失配会导致旋转损耗,且旋转损耗随旋转角度呈周期分布。旋转损耗对光子晶体光纤空气孔直径的改变不敏感,而对孔间距的变化敏感。采用电弧光纤熔接机熔接光子晶体光纤极易导致空气孔塌缩。优化参数避免空气孔塌缩,测量了 2 根相同的光子晶体光纤之间的最大和最小光功率输出,由此得到的旋转损耗与理论计算结果基本一致。测量结果表明 2 根相

同的光子晶体光纤之间明显存在因端面旋转导致模场失配引起的旋转损耗。该结果有助于进一步降低光子晶体光纤之间的熔接损耗。

## 参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 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
- 3 N. G. R. Broderick, T. M. Monro, P. J. Bennett *et al.*. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20): 1395~1397
- 4 Andrew D. Yablon. Optical Fiber Fusion Splicing [M]. Berlin: Springer Press, 2005. 112
- 5 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
- 6 Limin Xiao, M. S. Demokan, Wei 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
- 7 J. H. Chong, M. K. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1365~1370
- 8 C. Kerbage, A. Hale, A. Yablon *et al.*. Integrated all-fiber variable attenuator based on hybrid microstructure fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(19): 3191~3193
- 9 Bruno Bourliaguet, Claude Paré, Frédéric Émond *et al.*. Microstructured fiber splicing [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25): 3412~3417
- 10 U. Pekel, R. Mittra. An application of the perfectly matched layer (PML) concept to the finite element method frequency domain analysis of scattering problems [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, 1995, **5**(8): 258~260
- 11 Pierre Viale, Sebastien Fevrier, Frederie Gerome *et al.*. Confinement loss computations in photonic crystal fibres using a novel perfectly matched layer design [C]. Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference, 2005
- 12 Yeuk Lai Hoo, Wei Jin, Jian Ju *et al.*. Loss analysis of single-mode fiber/photonic-crystal fiber splice [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2004, **40**(5): 378~380
- 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 Zhongnan Xu, Kailiang Duan, Zejin Liu *et al.*. Numerical analyses of splice losses of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(23): 4527~4531