

单芯光纤与毛细管光纤的耦合方法及其机理

朱晓亮¹ 苑立波²

(¹浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018
²哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种单模光纤(SMF)与毛细管光纤耦合的有效方法,研究了两种不同结构毛细管光纤与单模光纤的耦合问题。通过对单模光纤与毛细管光纤熔点处进行熔融拉锥实现了单模光纤与毛细管光纤之间的高效耦合。对该耦合方法的耦合机理及耦合光传输特性进行了研究、对比,并通过实验对理论预测进行了验证。该耦合技术具有简便易行、耦合效率高的特点。

关键词 光通信;毛细管光纤;耦合理论;模场

中图分类号 TN252;TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0505009

Coupling Approach and Mechanism on Single Core Fiber and Capillary Optical Fiber

Zhu Xiaoliang¹ Yuan Libo²

(¹ College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China
² Photonics Research Center, College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract An effective linking and coupling method for single core single mode fiber (SMF) and capillary optical fiber is proposed. Two types of capillary optical fiber which have different structures are investigated. By splicing and tapering at the fusion point of single mode fiber and capillary optical fiber, an effective bi-tapered fiber coupling technique is implemented. The coupling mechanism and the transmission properties are studied and compared. The theoretical prediction is confirmed by the experimental results. The coupling approach is simple and efficiency.

Key words optical communications; capillary optical fiber; coupling theory; mode field

OCIS codes 060.2430; 060.2400

1 引言

近年来含孔光纤受到了广泛关注^[1~4],其中一种由空气孔、环形波导层及包层构成的毛细管光纤(COF)在化学^[5]、生物^[6]、智能结构自修复^[7]等领域掀起了研究热潮。

然而毛细管光纤特殊的光学结构使得其无论在光激励时还是在光探测时都具有极大的难度。为了解决这一问题,本文提出了一种单模光纤(SMF)与毛细管光纤耦合的有效方法,利用该方法分别对两

种不同结构的毛细管光纤与 SMF 的耦合问题进行了理论及实验研究。

2 单模光纤与内壁波导型毛细管光纤的耦合

选用两种具有代表性的毛细管光纤分别与单模光纤进行耦合研究,所用毛细管光纤截面如图 1 所示。两种毛细管光纤的不同之处在于环形波导层的位置,一种毛细管光纤的环形波导层环绕在中央空

收稿日期: 2010-12-29; 收到修改稿日期: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(60877046,61007053)资助课题。

作者简介: 朱晓亮(1981—),女,博士,讲师,主要从事光纤通信、光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhuxiaoliang@mail.zjgsu.edu.cn

气孔周围[如图 1(a)所示],称之为内壁波导型毛细管光纤;另一种其波导层嵌入在包层内,并将包层分隔为内包层、外包层[如图 1(b)所示],称之为壁中波导型毛细管光纤。

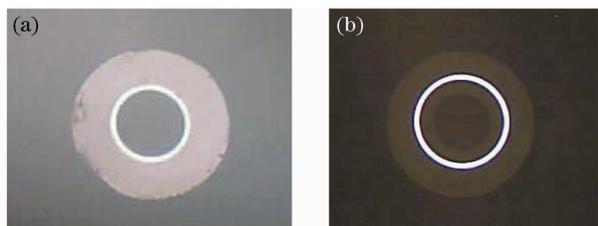


图 1 毛细管光纤横截面。(a)内壁波导型, (b)壁中波导型

Fig. 1 Cross-section of capillary optical fibers. (a) inner surface COF, (b) annular core embedded in the COF well

由于内壁波导型毛细管光纤的环形波导层在光纤熔接机内高温电弧作用下,中央空气孔发生塌陷形成锥形过渡区(如图 2 所示),内壁波导型毛细管光纤与 SMF 直接熔接即可实现光功率的高效耦合。



图 2 SMF 与内壁波导型毛细管光纤熔接处

Fig. 2 Photograph of SMF and inner surface COF at the splicing point

所用光源波长为 1310 nm,单模光纤的初始芯径为 $3.85 \mu\text{m}$,包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$,纤芯折射率和包层折射率分别为 $n_1 = 1.4544, n_2 = 1.45$ 。内壁波导型毛细管光纤环形芯和包层折射率分别为 $n'_1 = 1.456, n'_2 = 1.453$,环形芯内径及环形芯外径的初始值(未熔接时)分别为 $26 \mu\text{m}$ 与 $30 \mu\text{m}$,环形芯厚度为 $4 \mu\text{m}$ 。熔接后,内壁波导型毛细管光纤空气孔塌缩,塌缩区域与传统阶跃光纤特性相同,而未塌缩端仍然保留毛细管光纤的特性。因此,由光源注入 SMF 的基模场通过锥形过渡区可高效耦合进入内壁波导型毛细管光纤,在其输出端以环形模场出射。本文利用光束传播法(BPM)对这一过程进行了理论模拟,如图 3 所示。理论结果表明利用熔接方法即可实现 SMF 基模场到内壁波导型毛细管光纤环形模场的转换。

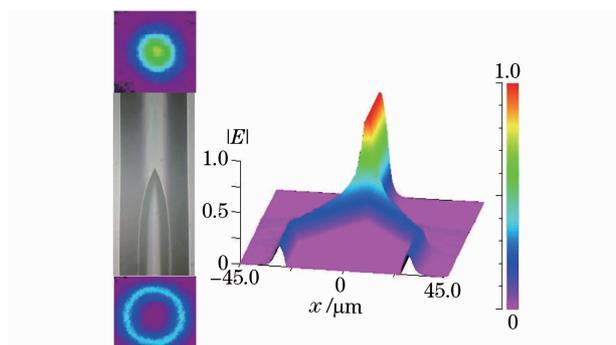


图 3 由 SMF 的基模场转变为 COF 的环形模场的光传输过程

Fig. 3 Conversion progress of mode field from fundamental mode to annular mode

为进一步对内壁波导型毛细管光纤的耦合特性进行研究,将熔接后的光纤在熔接点处进行熔融拉锥实验,并利用光束分析仪对拉锥过程中内壁波导型毛细管光纤的输出光场进行实时监测,得到不同时期内壁波导型毛细管光纤纤端环形光场分布,如图 4 所示。图 4(a)为 SMF 与内壁波导型毛细管光纤熔接后,内壁波导型毛细管光纤出射的环形场;图 4(b)、(c)分别为拉锥过程中内壁波导型毛细管光纤出射光功率的变化。使用 Matlab 对光束分析仪获取的实时监测图像进行灰度计算,灰度值的大小反映了光功率的大小。对已测定光功率的图像灰度值进行标定后,通过将各图像的灰度值与标定灰度值对比,可以算出各帧监测图像光功率的大小,从而可得如图 5 所示的拉锥过程中输出光功率实时变化曲线。

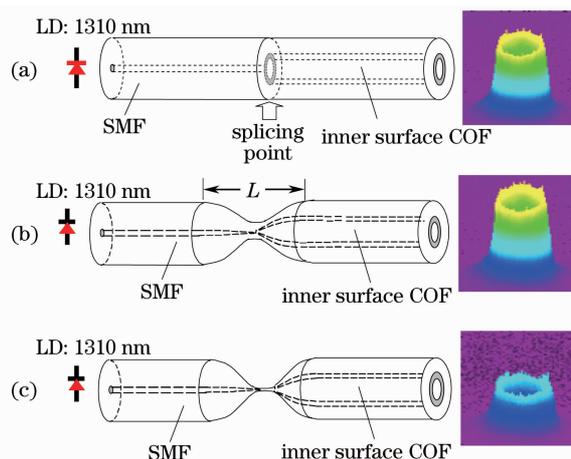


图 4 SMF 与内壁波导型毛细管光纤熔拉过程。(a)熔接,(b)熔锥区长度 L 为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$, (c) $L > 2 \text{ mm}$

Fig. 4 Far field distribution of inner surface COF during the progress of splicing and tapering. (a) aligned and butted, (b) tapered length L between $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$, (c) $L > 2 \text{ mm}$

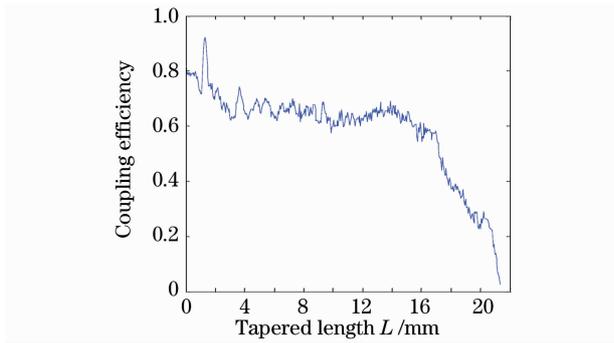


图 5 SMF 与内壁环形毛细管光纤熔拉过程中耦合光功率的变化

Fig. 5 Experimental results of SMF and the inner surface COF

由图 5 可见, SMF 与内壁波导型毛细管光纤熔接后, 输出光功率可高达 80%。拉锥长度为 1.5~2.0 mm 时, 内壁波导型毛细管光纤纤端出射光场光功率迅速增加, 最大值约为 93%。这是由于 SMF 的基模与内壁波导型毛细管光纤的环形模场匹配程度增大造成的。此后, 输出光场功率逐渐减小, 插入损耗逐渐增加, 这是因为熔拉区芯径过细使得光功率大部分转换为辐射模而被泄露掉。由图 5 实验结果可见, 拉锥过程中耦合光功率可达 90%, 甚至更高。这主要取决于内壁波导型毛细管光纤的特征参数, 当内壁型毛细管光纤发生塌陷时, 如果环形芯厚度、包层与环形芯的折射率差和 SMF 的纤芯参数相匹配, SMF 中的基模场将几乎无损耗地完全转变为毛细管光纤中的环形模场分布。此外, 还与 H_2-O_2 焰的形状及温度场分布等因素有关, 这些保证了熔锥区为平滑准双锥结构^[8]。

3 单模光纤与壁中波导型毛细管光纤的耦合

SMF 与壁中波导型毛细管光纤熔接后, 壁中波导型毛细管光纤同样发生塌陷, 如图 6 所示。但由于壁中波导型毛细管光纤具有 SiO_2 内包层, 从而造成熔接点处波导层不连续, 光源发出的光无法通过

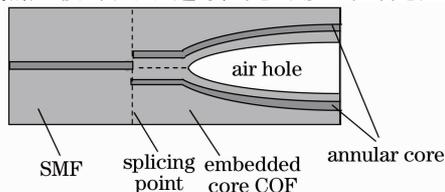


图 6 壁中波导型毛细管光纤与 SMF 熔接示意图

Fig. 6 Cross section of case for directly splicing embedded annularly core COF and SMF

SMF 传输进入壁中波导型毛细管光纤, 大部分光功率损失在壁中波导型毛细管光纤的内包层中。因此熔接耦合法对壁中波导型毛细管光纤并不适用。

利用熔融拉锥法对其熔接点处进行熔融拉锥操作, 实验示意图如图 7 所示。使用波长为 1310 nm 的激光二极管 (LD) 作光纤光源与 SMF 相连接, 利用光束分析仪对拉锥过程中壁中波导型毛细管光纤的输出光功率进行监测。使用光纤熔接机 (KL-260B 型) 将 SMF 与壁中波导型毛细管光纤相熔接, 由图 7(a) 可见壁中波导型毛细管光纤纤端只有很弱的光场, 这和内壁波导型毛细管光纤与 SMF 熔接后的情况明显不同。然后将熔接好的光纤移至光纤熔融拉锥机, 对熔接点处进行熔融拉锥 [如图 7(b) 所示]。随着熔融拉锥的进行, 光功率逐渐由 SMF 进入到壁中波导型毛细管光纤中, 当熔锥区达到一定长度 L 时, 大部分输入光功率由 SMF 耦合进入壁中波导型毛细管光纤中, 如图 7(c) 所示。

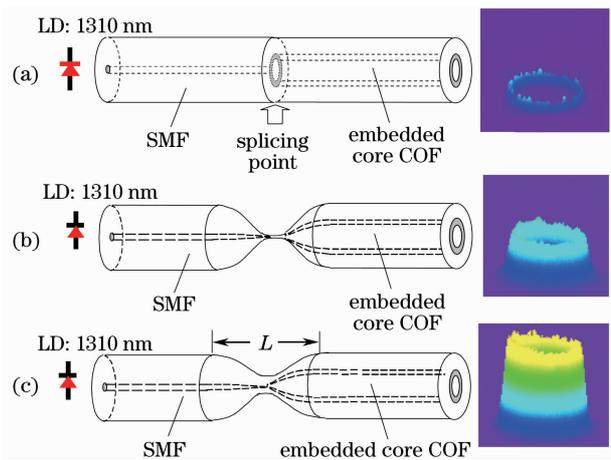


图 7 SMF 与壁中波导型毛细管光纤熔锥过程。(a) 熔接, (b) 对两光纤熔接点处加热拉锥, (c) 拉锥长度为 L 时壁中波导型毛细管光纤获得最大耦合效率

Fig. 7 Coupling progress of SMF to the annular core embedded COF. (a) aligned and butted, (b) heating and drawing at the fusion point, (c) maximum coupling efficiency achieved according to a certain tapered length L

假设两种光纤不存在对准问题, 准双锥结构是平滑的, 那么损耗主要是由 SMF 纤芯与壁中波导型毛细管光纤的环形波导纤芯之间模场失配造成的。因此, 使用模场叠加理论建立了 SMF 与壁中波导型毛细管光纤的耦合模型。由于 SMF 基模场与壁中波导型毛细管光纤高阶模场的耦合程度小于基模场之间的耦合, 因此考虑熔融拉锥过程中基模

场之间的模式匹配作为近似,毛细管光纤高阶模的影响将在以后的研究工作中进行。

通过对 SMF 模场分布函数 ψ_s 和壁中波导型毛细管光纤模场分布函数 ψ_h 的重叠积分^[9],可得到耦合光功率为

$$P = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_s \psi_h^* r dr \right|^2, \quad (1)$$

式中 ψ_s 和 ψ_h 满足归一化条件,即 $\int_{-\infty}^{\infty} \psi_s^2 r dr = 1$,

$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_h^2 r dr = 1$ 。 ψ_s 的基模场分布可利用高斯近似得

到,由于 SMF 与壁中波导型毛细管光纤熔接后,壁中波导型毛细管光纤中央空气孔在熔接机高温电弧作用下会发生塌陷,形成中间为实心的壁中环形芯光纤,因此可用传统弱导模理论^[10,11]计算熔拉过程中该种毛细管光纤的模场分布函数 ψ_h 。

壁中波导型毛细管光纤环形芯和包层(内包层及外包层)折射率分别为 $n'_1 = 1.456$, $n'_2 = 1.453$, 环形芯内径及环形芯外径的初始值(未拉锥时)分别为 $13.5 \mu\text{m}$ 与 $18.5 \mu\text{m}$, 环形芯厚度为 $5 \mu\text{m}$ 。利用以上参数可算出熔拉过程中耦合光功率 P 与 SMF 纤芯半径的关系。

要得出熔拉过程中对应最大耦合光功率的拉锥长度,需建立耦合光功率 P 与拉锥长度 L 之间的关系。根据孙伟民等^[12,13]提出的光纤锥形状与拉锥长度的关系式 $r'(\Delta z) = r_0 \exp\left(-\frac{\Delta z}{L_0}\right)$ ($r_0 = 62.5 \mu\text{m}$ 为锥腰初始半径, $\Delta z = L/2$, $L_0 = 4 \text{ mm}$ 为加热温度场宽度),可推出拉锥过程中纤芯半径 a 与拉锥长度 L 的表达关系式。由此可得,熔锥长度 L 与 SMF 芯径 a 的关系为

$$L = -2L_0 \times \ln(a/a_0). \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,可得耦合光功率 P 与拉锥长度 L 之间的关系,如图 8 所示,其中实线表示通过耦合模型得到的理论值,圆圈表示拉锥过程中得到的实验值。

由图 8 可见:1)实验结果与理论预测吻合良好,耦合光功率在熔锥区长度 15 mm 附近有最大值;2)无论是理论上还是实验中,最大耦合光功率均不为 1。这是由于壁中波导型毛细管光纤具有内包层,在整个熔拉过程中单芯单模光的模场 ψ_s 与壁中波导型毛细管光纤的模场 ψ_h 不能完全匹配造成的;3)熔融拉锥法极大地提高了 SMF 与壁中波导型毛细管光纤的连接耦合效率。

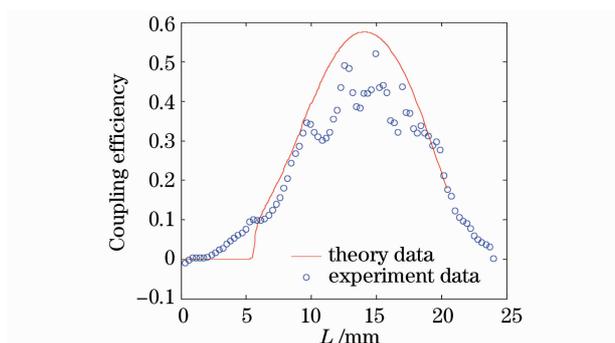


图 8 耦合光功率与拉锥长度之间的关系

Fig. 8 Relationship between coupling efficiency and tapered length L

4 结 论

提出了一种 SMF 与毛细管光纤耦合的有效方法,研究了两种不同结构毛细管光纤与 SMF 的耦合问题,通过对 SMF 与毛细管光纤熔点处进行熔融拉锥操作,实现了 SMF 与毛细管光纤光功率的高效耦合。对耦合过程中光传输特性及耦合光功率的变化进行了定量分析和定性计算。实验装置可对熔拉过程中毛细管光纤的耦合光功率进行实时监测,所得实验结果与理论预测吻合良好,证明了理论分析方法的可行性。这种耦合方法易于控制毛细管光纤的耦合光功率,易于将基于毛细管光纤构造的光学元器件与 SMF 系统进行连接,对于毛细管光纤在生化、传感等多领域的进一步应用具有一定的意义。

参 考 文 献

- 1 Zhu Tao, Xu Min, Rao Yunjiang *et al.*. Miniature humidity sensor based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1592~1596
- 2 朱涛,徐敏,饶云江等. 基于空芯光纤的集成式全光纤法-珀干涉式湿度传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1592~1596
- 3 Cui Junhong, Ding Hui, Li Xianli *et al.*. Acetylene sensing system using hollow-core photonic crystal fiber as gas cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2262~2266
- 4 崔俊红,丁晖,李仙丽等. 基于空芯光子晶体光纤气体吸收腔的乙炔检测系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2262~2266
- 5 Jiang Junfeng, Li Haiwei, Liu Tiegeng *et al.*. Experimental research on micro-tube biosensor based on hollow optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1421~1425
- 6 江峻峰,李海伟,刘铁根等. 基于空心光纤构建微管生物传感器的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1421~1425
- 7 Li Dongxue, Wang Ding, Chen Xiaowei *et al.*. Generation of high-energy few-cycle pulses compression through a hollow-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1939~1942
- 8 李冬雪,王丁,陈晓伟等. 基于空心光纤技术产生高能量周期量级脉冲压缩[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1939~1942
- 9 B. K. Keller, M. D. De Grandpre, C. P. Palmer. Wave guiding properties of fiber-optic capillaries for chemical sensing

- applications[J]. *Sensor Actuat. B: Chemical*, 2007, **120**(2): 724~731
- 6 M. Ohtsu. Progress of high-resolution photon scanning tunneling microscopy due to a nanometric fiber probe[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1200~1221
- 7 J. W. C. Pang, I. P. Bond. A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, **65**(11-12): 1791~1799
- 8 Yuan Libo, Yang Jun, Zhu Xiaoliang. Capillary fiber and standard fiber linking approach: China, CN101339275A[P]. 2009-01-07
苑立波, 杨军, 朱晓亮. 毛细管光纤与标准光纤的连接方法: 中国, CN101339275A[P]. 2009-01-07
- 9 Ma Huilian, Yang Jianyi, Li Jin *et al.*. Optical waveguide-fiber direct coupling[J]. *Study on Optical Communications*, 2000, **99**(3): 43~47
- 马慧莲, 杨建义, 李瑾等. 光波导-单模光纤的直接耦合[J]. 光通信研究, 2000, **99**(3): 43~47
- 10 W. Wang, J. Yin, W. Gao *et al.*. Frauholfer and Fresnel field distributions from the LP₀₁ mode in a micro-sized hollow optical fibre[J]. *J. Mod. Opt.*, 1998, **45**(9): 1899~1912
- 11 C. Won, S. H. Yoo, K. Oh *et al.*. Near-field diffraction by a hollow-core optical fiber[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **161**(1-3): 25~30
- 12 Sun Weimin, Shi Shuai, Dai Qiang. Fabrication and measurement of tapered fibers[J]. *J. Optoelectro • Laser*, 2009, **11**(20): 1474~1477
孙伟民, 时帅, 戴强. 拉锥光纤的制作工艺与测试方法[J]. 光电子 • 激光, 2009, **11**(20): 1474~1477
- 13 T. A. Birks, Y. W. Li. The shape of fiber tapers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4): 432~438



2011年“纪念《光学学报》创刊30周年特刊” 征 稿 启 事

创刊于1981年的《光学学报》是中国光学学会主办的第一本期刊。30年来,在历任主编王大珩院士、王之江院士、王润文研究员、徐至展院士和现任主编曹健林研究员的领导下,《光学学报》取得了一系列的成绩。2010年影响因子达到2.0,在国内物理类科技期刊中排名第一,连续7年荣获“百种中国杰出学术期刊”,被世界重要检索系统EI,CA, AJ和INSPEC等收录。《光学学报》始终致力于为我国光学科技人员与国内外同行进行学术交流、开展学术讨论以跟踪学科前沿和发展我国光学事业服务。《光学学报》刊登的论文集中反映了中国光学科技的新概念、新成果和新进展,其内容主要包括光纤光学与光通信、激光光学、信息光学、光学测量、光谱学、薄膜光学、量子光学、非线性光学、光学器件和材料等。为了纪念《光学学报》创刊30周年,编辑部计划在2011年9月正刊上出版“纪念《光学学报》创刊30周年特刊”,现特向国内外广大专家征集研究快报、研究论文和综述,以期集中反映我国近年来在光学及其相关领域取得的重大成就。

征稿范围:

光学及其相关领域。

稿件类型:

- 1、简要报道课题组最新研究成果的研究快报;
- 2、具有较高的创新性的原创研究论文;
- 3、国内外知名专家亲自撰写的综述文章。

特刊稿件截稿日期:2011年7月10日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(请在留言中标明“纪念《光学学报》创刊30周年特刊”投稿),详情请参见<http://www.opticsjournal.net>。本特刊投稿文体为中文,电子版请使用MS-word格式。有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn,电话:021-69918427-802。