

# 单模光纤与新型毛细管光纤的侧抛耦合

朱晓亮<sup>1,2</sup> 张晓东<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018

<sup>3</sup> 杭州科技职业技术学院机电学院, 浙江 杭州 311402

**摘要** 单模光纤与毛细管光纤(COF)的侧抛耦合不会破坏 COF 的中央空气孔,使 COF 可以很方便地用作原子导引或采样管。实验研究了单模光纤与一种新型 COF 的侧抛耦合,并证明了该种耦合方法切实可行。通过解析方程计算了侧抛光纤剩余包层的厚度与耦合光功率的定量关系,为 COF 侧抛耦合的进一步研究奠定了基础。另外,侧抛耦合方式可使 COF 或其他类似微结构光纤应用更广。

**关键词** 光纤光学;侧抛耦合;毛细管光纤;耦合方程;微结构光纤

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0605006

## Side-Polished Coupling for a Single-Mode Fiber and a Novel Capillary Optical Fiber

Zhu Xiaoliang<sup>1,2</sup> Zhang Xiaodong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Science and Photonics Research Center, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

<sup>3</sup> College of Mechanical and Electrical, Hangzhou Polytechnic, Hangzhou, Zhejiang 311402, China

**Abstract** Side-polished coupling cannot damage the central air hole of capillary optical fiber(COF), so that COF can be conveniently used as atomic guiding or sampling tube. Side-polished coupling of single mode fiber and a novel COF is studied by experiment. And the results prove the coupling method is feasible. By analytical equations, the quantitative relationship between the thickness of the residual cladding and the coupling optical power is calculated. It may be the basis for further study on the side-polished coupling for COFs. Side-polished coupling method also can expand the application of COF or other similar microstructure fiber.

**Key words** fiber optics; side-polished coupling; capillary optical fiber; coupling equation; microstructure fiber

**OCIS codes** 060.2330; 060.2400; 130.1750; 230.1150; 280.1414

## 1 引言

近年来含孔光纤受到了广泛关注<sup>[1~4]</sup>,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)在诸多领域掀起了研究热潮,COF除了被广泛应用于光纤传感领域以外,还是天然的原子导引<sup>[5]</sup>和采样管。作为原子导引,环形芯中的消逝波为原子束提供了斥力势阱,能够保持原子在光纤的

轴向运动。作为采样管,COF对于气体或液体能提取很精细的采样容量。因此经常用COF的空气孔作为水、氢气或甲烷类气体<sup>[6]</sup>、液体<sup>[7]</sup>、液晶、冷原子等物质的腔室。

COF的这些优势极大地促进了其发展和应用。为了使COF更易应用于单模光纤系统中,提出一种简单有效的耦合方法<sup>[8,9]</sup>。通过使用光纤熔接机对

收稿日期: 2013-01-02; 收到修改稿日期: 2013-02-06

基金项目: 浙江省教育厅基金(Y201223669)资助课题。

作者简介: 朱晓亮(1981-),女,讲师,博士,主要从事光纤通信和集成光学等方面的研究。

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

标准单模光纤和 COF 熔接, COF 在高温电弧的作用下会塌陷形成实心光纤, 使熔点处波导层连续, 这样光功率就可以从单芯单模光纤耦合进入 COF。然而, 由于熔接后的 COF 一端塌陷封闭, 所以利用 COF 用作原子导引或采样导管时该方法并不适用。

多年来人们对侧抛单模光纤之间消逝场的耦合进行了广泛地研究<sup>[10]</sup>, 然而对单模光纤与 COF 之间的侧抛耦合研究较少。为使 COF 在原子导引和采样领域应用更广, 本文对单模光纤与一种新型 COF 的侧抛耦合进行了实验研究与理论分析。该种 COF 由位于包层之中的环形波导层和中央空气孔构成, 与传统 COF 相比, 该新型 COF 结构上增加了内包层。介绍了侧抛光纤的制作技术, 研究了侧抛光纤能量耦合特性, 讨论了侧抛光纤剩余包层厚度与耦合特性之间的关系。

## 2 侧抛光纤的制备

从耦合器到调制器及光开关等所有的光学元器

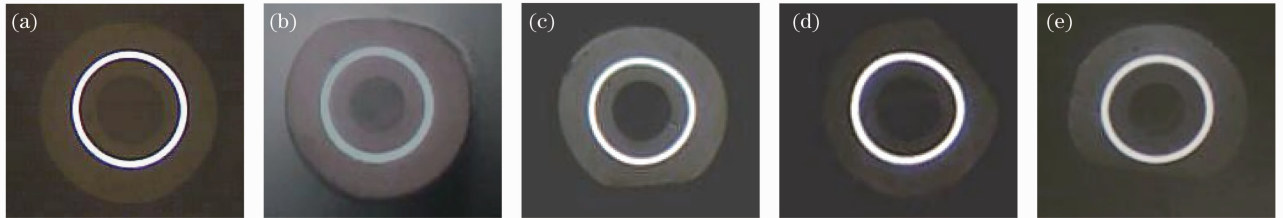


图 2 侧抛深度不同时 COF 截面。(a) 0; (b) 3  $\mu\text{m}$ ; (c) 6  $\mu\text{m}$ ; (d) 7  $\mu\text{m}$ ; (e) 10  $\mu\text{m}$

Fig. 2 Profile images of the novel COF with different polished depths. (a) 0; (b) 3  $\mu\text{m}$ ; (c) 6  $\mu\text{m}$ ; (d) 7  $\mu\text{m}$ ; (e) 10  $\mu\text{m}$

经过初抛之后, 使用二氧化铈颗粒直径为 1  $\mu\text{m}$  的聚氨酯板对石英基板和光纤进行细抛。并用同样的方法制备侧抛标准单模光纤。研磨结束后在磨面上加一小滴折射率与光纤相同的折射率匹配液, 再把两块抛磨好的单模光纤 (SMF) 石英基板及新型 COF 石英基板对合, 使光纤的磨抛面重合。SMF 输入端与波长为 1310 nm 的半导体激光 (LD) 光源相连接。在侧抛区, 由于 SMF 与 COF 芯间距足够小, 两波导之间会产生互耦现象。输出光场通过透镜后由光束分析仪接收, 在与之相连的电脑上可观察到与纤端出射光场分布相同, 具有一定放大倍数的场分布。

当两种光纤芯间距最小距离约为 2.65  $\mu\text{m}$ , 光纤侧抛平坦区约为 10.6 mm 时, 光束分析仪观察到的光纤出射模场分布如图 3 所示, 实验现象表明这种耦合方法对 COF 具有可行性。这种耦合技术没有破坏 COF 中央的空气孔, COF 可以很方便地用作原子导引或采样管。但由于该 COF 包层折射率

件都是通过光纤相互作用的倏逝场得到的, 这种倏逝场可通过侧面抛去光纤的包层得到。提出一种单模光纤与侧抛 COF 倏逝场耦合技术, 并用实验证明该种方法的可行性。

实验所用侧抛光纤是使用典型的研磨法制备的<sup>[11]</sup>, 研磨轮由与电脑相连的步进电机控制。光纤侧抛装置如图 1 所示, 光纤固定在石英基板的 V 形槽内, 将石英和光纤一起研磨、抛光, 除去部分光纤包层。侧抛不同深度的新型 COF 横截面照片如图 2 所示。

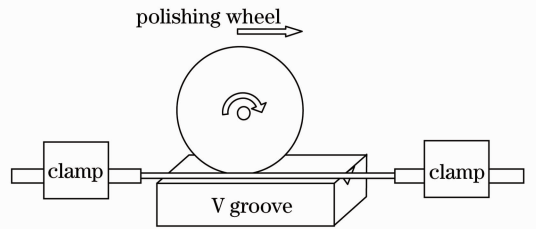


图 1 侧抛耦合装置

Fig. 1 Schematic diagram of fiber polishing arrangement

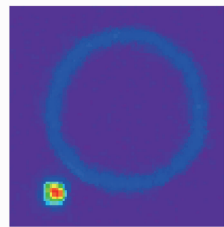


图 3 SMF 与新型 COF 侧抛耦合出射光场

Fig. 3 Mutual coupling mode field of SMF and the novel COF on the CCD

( $n_{cl}=1.456$ ) 与 SMF 包层折射率 ( $n'_{cl}=1.45$ ) 不匹配, 因此在两光纤重合的研磨区有较大损耗, 另外由于侧抛耦合对工艺要求较高, 带来的附加损耗也要比光纤对接耦合大, 因此研究发现 SMF 与新型 COF 侧抛耦合光功率损耗大。图 3 所示情况, 损耗光功率约为 52 dB。当芯间距更大时, 受光损耗及 CCD 分辨率影响, 在实验中几乎观测不到该 COF 的出射光场。

### 3 工作原理

由于 LP<sub>01</sub> 模和其他高阶模之间的耦合非常小，可以忽略不计，因此考虑 SMF 与新型 COF LP<sub>01</sub> 模之间的耦合作为近似。

#### 3.1 新型 COF 的 LP<sub>01</sub> 模场

实验室用的新型 COF 端面结构及其折射率分布如图 4 所示。 $n_a, n_{co}$  及  $n_{cl}$  分别表示中央空气孔、纤芯及内外包层的折射率。其中  $n_a = 1.0, n_{co} = 1.46$  及  $n_{cl} = 1.456$ 。纤芯和包层之间的相对折射率差为 0.27%；各层半径分别为  $r_1 = 33.5 \mu\text{m}, r_2 = 37.5 \mu\text{m}, r_3 = 62.5 \mu\text{m}$ 。

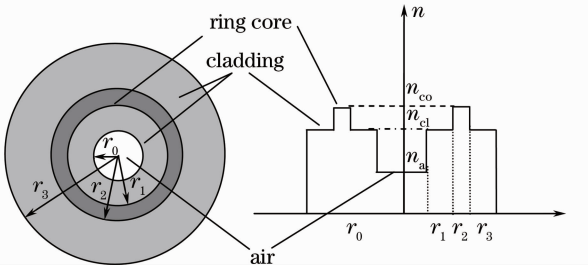


图 4 新型 COF 端面结构及折射率分布

Fig. 4 Schematic diagram of the novel COF and its corresponding refractive index profile

实验中所用新型 COF 内包层厚度约为  $10.5 \mu\text{m}$ ，远远大于光源波长  $1.31 \mu\text{m}$ 。因此将该 COF 近似看作实心环形光纤，对其模场进行计算。由于环形芯和内外包层折射率差值很小 ( $\Delta n \ll 1$ )，因此传统的弱导模分析对于该新型 COF 同样有效。新型 COF 的横向电场分布为

$$E_C = \begin{cases} AI_m(V_C r/r_1), & r < r_1 \\ BJ_m(U_C r/r_1) + CN_m(U_C r/r_1), & r_1 < r < r_2 \\ DK_m(W_C r/r_1), & r > r_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} U_C = r_1 \sqrt{n_{co}^2 k_0^2 - \beta_C^2} \\ V_C = r_1 \sqrt{\beta_C^2 - n_a^2 k_0^2} \\ W_C = r_1 \sqrt{\beta_C^2 - n_{cl}^2 k_0^2} \end{cases} \quad (2)$$

此处  $\beta_C$  为新型 COF 的传播常数， $J_m, N_m (I_m, K_m)$  分别为第一类和第二类(修正) $m$  阶贝塞尔函数。

由边界条件，即  $\psi_h$  和  $\partial\psi_h/\partial r$  在  $r_1$  和  $r_2$  处连续，可确定对应于 LP<sub>01</sub> 模的传播常数  $\beta_C$  和系数  $A, B, C, D$  [12]。将  $A, B, C, D$  代入(1)式，可得到新型 COF 对应于 LP<sub>01</sub> 模的场分布  $\psi_C$ ，如图 5 所示。

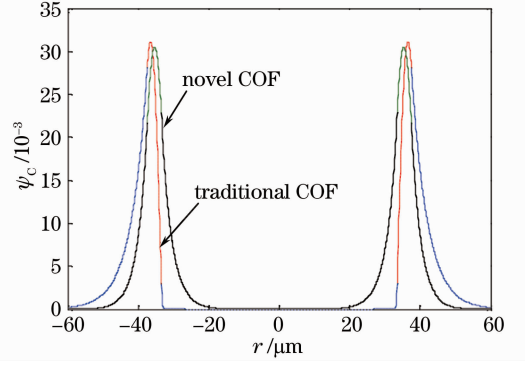


图 5 新型 COF 及 COF LP<sub>01</sub> 模场分布

Fig. 5 Comparison of LP<sub>01</sub> mode fields between the novel COF and traditional COF without inner cladding

为了便于对比，同时计算了相同参数时，传统 COF LP<sub>01</sub> 模的模场分布。由图 5 可知，该新型 COF 的模场分布与具有同样参数的传统 COF 相比，其模场分布进入空气孔较深，更利于用作原子导引或内表面生化修饰后用作光纤生化传感探头。

#### 3.2 标准单模光纤与新型 COF 的侧抛耦合原理

SMF 与 COF 两者之间的最小距离是决定这种光学元器件应用性能的重要变量 [13, 14]。基于耦合模理论建立了最小芯间距  $d$  与侧抛新型 COF 耦合效率的关系。

在弱导模条件下，SMF 的基模横向电场分布为

$$E_S = \begin{cases} EJ_0(U_S r/r_0), & r < r_0 \\ FK_0(W_S r/r_0), & r > r_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $J_0$  和  $K_0$  分别为零阶第一类贝塞尔函数和零阶第二类修正贝塞尔函数。 $r_0 = 3.85 \mu\text{m}$  为 SMF 的纤芯半径。传输常数  $\beta_S$  和系数  $E, F$  可由边界条件确定 [11]，将其代入(3)式，可得到 SMF 的横向场分布  $E_S$ 。

假设两光波导之间没有散射和反射，根据耦合模理论，两光波导之间的耦合可由 SMF 和 COF 的横向场表达式 [(1)式和(3)式] 确定。当归一化光功率仅由 SMF 入射时，即 SMF 的光功率  $P_S(0) = 1$ ，COF 的光功率  $P_C(0) = 0$ ，根据耦合方程 [15]、(1)式和(3)式可得耦合效率  $P_C$  为最小芯间距  $d$  和传输长度  $L$  的函数，计算得到的结果如图 6 所示。

由理论结果可知，COF 的耦合效率与包层抛磨量之间存在明确的关系。对于固定的抛磨长度，该函数关系具有理论指导作用，且可对耦合效率进行预测。

根据拍长的定义 [15]

$$L_B = \frac{\pi F'}{K} = \frac{\pi}{K \sqrt{1 + [\Delta\beta/(2K)]^2}}, \quad (7)$$

式中  $K$  为耦合系数,  $F^2$  为 COF 的最大耦合率(即  $P_C$  的最大值)。对最大耦合效率、拍长和最小芯间距  $d$  之间的关系进行计算,结果如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可见,随着两光纤芯间距的增加,最大耦合效率随着最小芯间距  $d$  的增加而减小,拍

长  $L_B$  随着最小芯间距  $d$  的增加而增加。这是由于随着侧抛光纤剩余包层厚度增加,倏逝场变弱引起的。应注意,当  $d > 15 \mu\text{m}$  时,耦合效率明显降低;当  $d > 30 \mu\text{m}$  时,互耦现象几乎不发生。

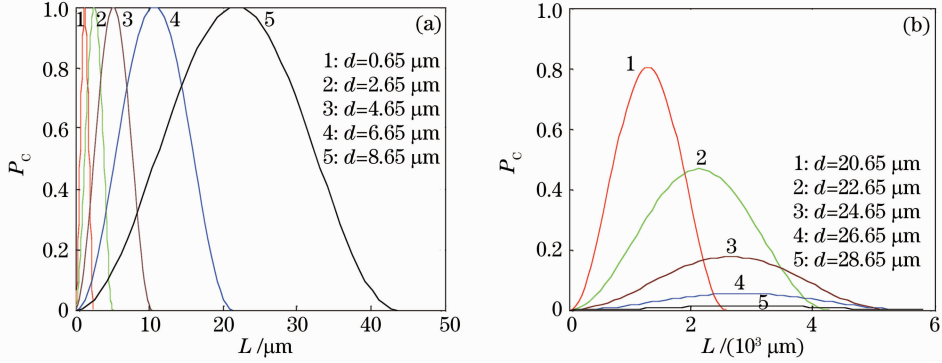


图 6 在不同最小芯间距下,侧抛新型 COF 耦合效率与传输长度关系

Fig. 6 Coupling efficiency of side-polished novel COF as a function of  $L$  with different  $d$

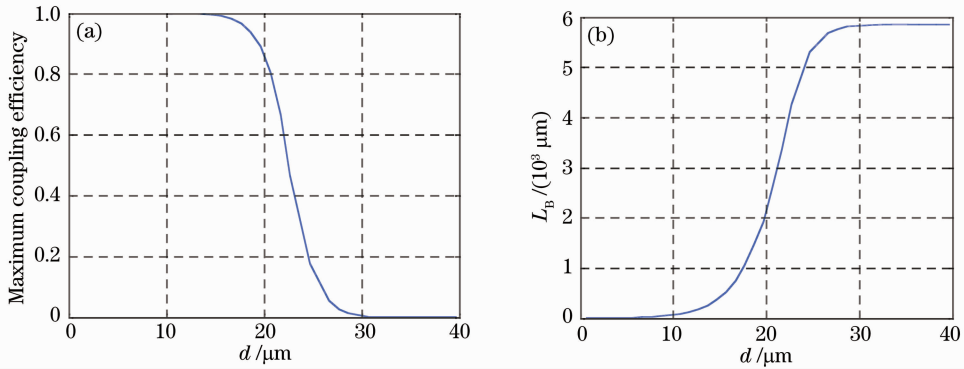


图 7 侧抛新型 COF(a)最大耦合效率和(b)拍长与最小芯间距的函数关系

Fig. 7 (a) Maximum coupling efficiency and (b) beat length of side-polished novel COF as a function of  $d$

## 4 结 论

对 SMF 与新型 COF 之间的倏逝场耦合进行了实验验证,并基于耦合模理论,对 SMF 和新型 COF 的侧抛耦合特性进行了研究。结果表明,两光纤之间剩余包层厚度与新型 COF 耦合效率之间存在明确关系。该结果可为 COF 与 SMF 的侧抛耦合提供理论指导,有利于该种光纤在生化、原子导引等领域的进一步应用。

## 参 考 文 献

- Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0628001
- 赵华新, 蒋永翔, 罗天穹 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0628001
- Chen Xiaodong. Characteristics of all-fiber gas Raman light source based on hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J].

- Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0505003
- 陈晓东. 基于氢气填充空芯光子晶体光纤的全光纤型气体拉曼光源特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0505003
- Ma Lingfang, Liu Min, Li Dan *et al.*. A kind of hollow dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0805006
- 马玲芳, 刘敏, 李丹 等. 零模间色散双空芯光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0805006
- Chen Yixin, Zhao Chunliu, Liu Xing *et al.*. Research and development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 010055
- 陈益新, 赵春柳, 刘星 等. 基于光子晶体光纤环境的光纤传感器的研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 010055
- Y. I. Shin, K. Kim, J. A. Kim *et al.*. Diffraction-limited dark laser spot produced by a hollow optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(3): 119~121
- W. Peng, G. R. Pickrel, F. Shen *et al.*. Hollow fiber optic waveguide gas sensor for simultaneous monitoring of multiple gas species[C]. *SPIE*, 2004, **5589**: 1~7
- R. Altcorn, I. Koev, R. P. VanDuyne *et al.*. Low loss liquid-

- core optical fiber for low-refractive-index liquids; fabrication, characterization, and application in Raman spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(34): 8992~8998
- 8 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo. Coupling approach and mechanism on single core fiber and capillary optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505009  
朱晓亮, 苑立波. 单芯光纤与毛细管光纤的耦合方法及其机理[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505009
- 9 Libo Yuan, Xiaoliang Zhu, Tao Zhang *et al.*. Capillary optical fiber linking approach for biosensors[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750372
- 10 A. T. Andreev, B. S. Zafirova, E. I. Karakoleva. Single-mode fiber polished into the core as a sensor element[J]. *Sens. and Act.*, 1998, **64**(3): 209~212
- 11 S. T. Nicholls. Automatic manufacture of polished single-mode fibre directional coupler[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(R): 825~826
- 12 J. R. Cozens, A. C. Boucouvalas. Coaxial optical coupler[J]. *Electron. Lett.*, 1982, **18**(3): 138~140
- 13 S. P. Ma, S. M. Tseng. High-performance side-polished fibers and applications as liquid crystal clad fiber polarizers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1554~1558
- 14 S. M. Tseng, C. L. Chen. Side polished fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(8): 3438~3447
- 15 Allan W. Snyder, John D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: New York, 1983. 570~574

栏目编辑：王晓球