

微纳光纤端面反射特性的实验测量方法*

侯建平[†] 赵晨阳 杨楠 郝建苹 赵建林

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

(2012年12月25日收到; 2013年1月25日收到修改稿)

微纳光纤的端面反射特性是影响其传输特性及实际应用的重要因素之一. 本文提出了一种基于光环形器的微纳光纤端面反射特性测量方法. 该方法克服了 3 dB 耦合器直接测量法的不足, 通过引入气凝胶固定和功率补偿, 可有效地消除微纳光纤尾纤飘摆、光源输出不稳定及其内部损耗等不利因素, 从而提高测量的准确度. 采用该方案实验测量了微纳光纤的端面反射率及其与光纤直径和传输波长间的关系. 实验结果与数值模拟结果相符, 表明该方法可有效地用于微纳光纤端面反射率测量及其与各特性参数之间关系的分析, 这对于微纳光纤激光器、放大器、耦合器及滤波器等光学微型器件的设计制作具有重要意义.

关键词: 光纤光学, 微纳光纤, 端面反射, 光环形器

PACS: 42.81.-i, 81.07.Gf, 78.68.+m, 07.60.Vg

DOI: 10.7498/aps.62.144216

1 引言

微纳光纤 (micro-nano fiber, MNF) 是指纤芯直径在几百纳米至几微米之间的光纤^[1], 这类光纤能够将光局域在微纳米尺度内并实现低损耗传输. 由于具有强倏逝场、强光场约束、大波导色散、易于弯曲等特点^[2-6], 使得 MNF 在微纳米尺度的光传输、耦合、调制、谐振、放大以及传感等应用方面具有非常诱人的应用前景.

MNF 的端面反射特性作为其传输特性的一个重要方面, 对其各种应用, 特别是 MNF 传感器^[7-9]、微腔激光器^[10,11]、微腔环形器^[12] 等应用具有非常重要的影响. 有关 MNF 端面反射特性的研究, 目前主要限于理论和数值模拟分析. 如文献^[13, 14] 曾采用三维有限时域差分法 (three-dimension finite-difference time-domain, 3D-FDTD) 数值分析了 MNF 的端面反射率与 MNF 直径、传输波长和外介质折射率之间的关系, 但没有给出相应的实验研究结果. 目前, 测量光纤端面反射功率的方法主要是通过接入光路中的 3 dB 耦合器来实现^[15], 但该方法存在固有不足, 即测得的反射功率中也包含了另一空闲端口反射的贡献, 同时, 一部分反射光还会返回到

光源光路, 从而对光源工作的稳定性造成一定影响. 相对于标准单模光纤而言, MNF 的端面更小, 反射能量更弱, 上述问题以及尾纤摆动、内部损耗对端面反射功率测量的准确性影响更大. 为此, 本文结合气凝胶固定和补偿法, 提出一种基于光环形器的 MNF 端面反射特性测量方法.

2 MNF 的端面反射特性测试方法与实验

图 1 所示为设计的基于光环形器的 MNF 端面反射特性测量装置. 首先利用 3 dB 耦合器将来自光源的光分成两束, 其中一束作为参考光直接进入光功率计 1, 用以探测输入光功率; 另一束作为测试光进入环形器端口 1, 再由环形器端口 2 进入待测 MNF, 经端面反射后, 由环形器端口 3 输出, 并由光功率计 2 接收. 实验中, 采用气凝胶 ($n = 1.01$) 将 MNF 固定, 以减少其在空气中随机摆动对实验结果的影响. 待测 MNF 样品由标准单模光纤 (SMF28) 经氢氧焰下加热软化后拉制而成, 其直径可由加热火焰的大小和步进电机的速度联合控制, 得到的 MNF 直径均匀, 表面光滑. 光纤端面的情况包括端面平整度和端面与光纤轴的夹角等对端

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921902) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: houjp@nwpu.edu.cn

面反射率都有重要影响. 考虑一般性, 本实验要求端面平整且与光纤轴垂直. 实验中我们采用专用切割刀对拉制的光纤进行切割, 然后通过显微镜 (DMM-330C, Caikon Inc.) 检查确保端面质量. 如果要获取其他类型的端面如部分切割或成一定角度切割则可以采用文献 [8] 所述工艺, 采用聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 进行切割, 从而获得满足要求的样品.

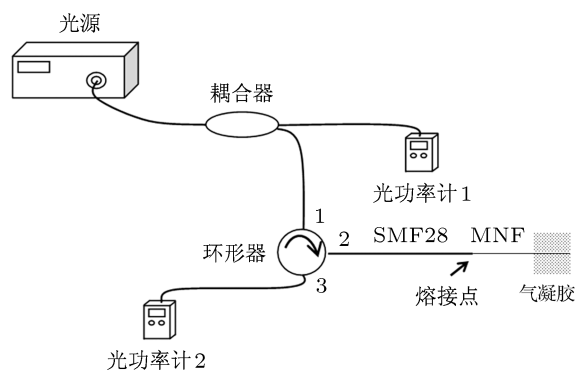


图 1 MNF 端面反射率实验测量装置

在上述实验系统中, 功率计 2 实际接收到的光功率除光纤反射端面反射的功率外还包含了光路中一些光纤连接端面的回波反射功率. 此外, 环形器的插入损耗和 MNF 的传输损耗也均会对 MNF 端面反射率的测量结果造成不可忽略的影响. 为了提高 MNF 端面反射率的测量精度, 降低测量误差, 实验中采用补偿法. 具体如下: 首先通过光功率计 1, 2, 探测到 MNF 放置于气凝胶中的总输出功率 P_1 和 P_2 ; 然后将 MNF 反射端面浸入折射率匹配液中, 测得除端面反射以外的回波反射功率 P_b . 计及环形器的插入损耗和 MNF 的传输损耗后, 可得:

$$-10 \lg \frac{P_1}{P_1 - P_b} = L_{(1-2)} + L_{(M)}, \quad (1)$$

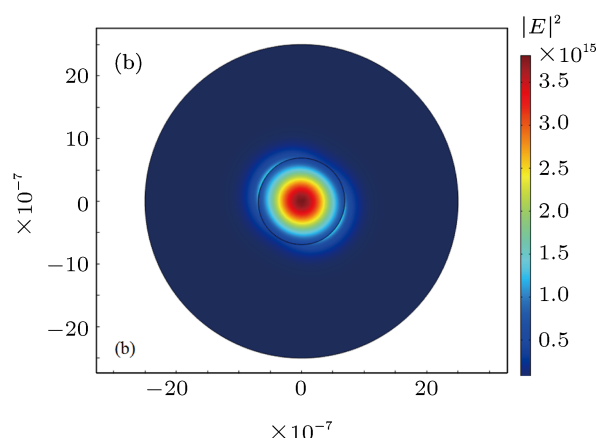
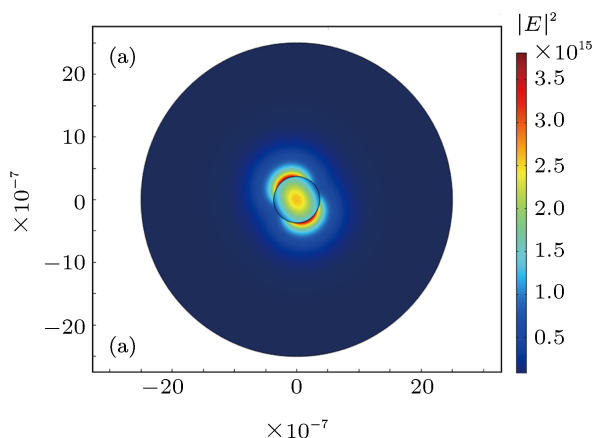


图 3 不同直径的数值模拟 (a) $d = 740 \text{ nm}$ 的光场分布; (b) $d = 1380 \text{ nm}$ 的光场分布

$$-10 \lg \frac{P_2 - P_b}{P_o} = L_{(2-3)} + L_{(M)}, \quad (2)$$

式中, $L_{(1-2)}$ 和 $L_{(2-3)}$ 分别为对应的环形器插入损耗, $L_{(M)}$ 为 MNF 的传输损耗 [16,17], P_1 为输入光功率, P_o 为 MNF 端面反射的输出光功率, 则端面反射率为

$$R = (P_o / P_1) \times 100\%. \quad (3)$$

将 (1) 和 (2) 式代入 (3) 式, 可得:

$$R = \frac{P_2 - P_b}{P_1 - P_b} \times 10^{\frac{L_{(1-2)} + L_{(2-3)} + 2L_{(M)}}{10}} \times 100\%. \quad (4)$$

图 2 给出了传输波长为 1550 nm 时, MNF 端面反射率与光纤直径关系的实验测量结果, 其中虚线是实验数据的二次拟合结果, 实线是采用 COMSOL 软件计算得到的数值模拟结果. 可见实验结果与数值计算结果基本一致, 少量偏移应主要源于光纤受挤压和弯曲等所致. 从图中可以看出, 随着 MNF 直径的减小, 端面反射率减小. 当直径为 1380 nm 时, 端面反射率为 0.622%; 当直径减小到 740 nm 时, 端面反射率减小到 0.437%.

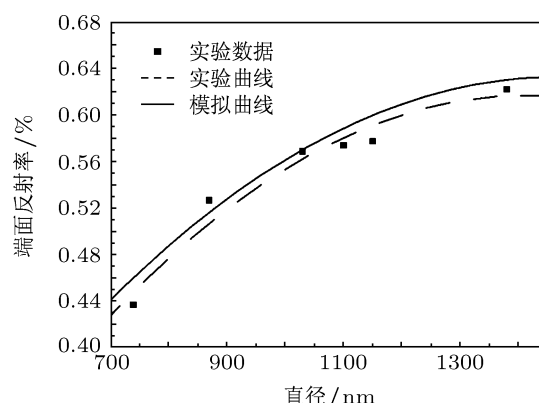


图 2 MNF 端面反射率与直径的关系

图 3 为两种不同直径 MNF 光场分布的模拟结果. 由图可以看出, $d = 740 \text{ nm}$ 的纤外能量比例大于 $d = 1380 \text{ nm}$, 表明直径小的光纤能量部分泄漏到外介质中, 因此导致 MNF 端面反射率的减小.

图 4 所示为 MNF 端面反射率与传输波长关系的实验测量结果. 利用 ASE 宽带光源 (FLS-2300B, EXFO Inc.) 将光耦合进直径为 640 nm 的 MNF, 用光谱分析仪 (AQ6317C, ANDO Inc.) 代替功率计 2 检测系统的反射光谱. 从图中可以看出, 当波长从 1530 nm 变化到 1610 nm 时, 端面反射率随波长增加而不断减小, 并且实验结果与数值计算结果基本保持一致.

对比选取 1530 nm 和 1610 nm 两种波长, 计算其在直径 640 nm 的 MNF 中传输时的光场分布

进行验证, 结果如图 5 所示. 由图可以看出, $\lambda = 1610 \text{ nm}$ 时的中心能量低于 $\lambda = 1530 \text{ nm}$, 而倏逝能量则较大, 相应地从端面反射的能量较少.

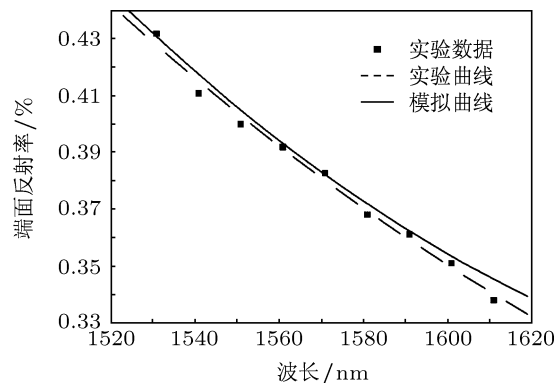


图 4 MNF 端面反射率与传输波长的关系

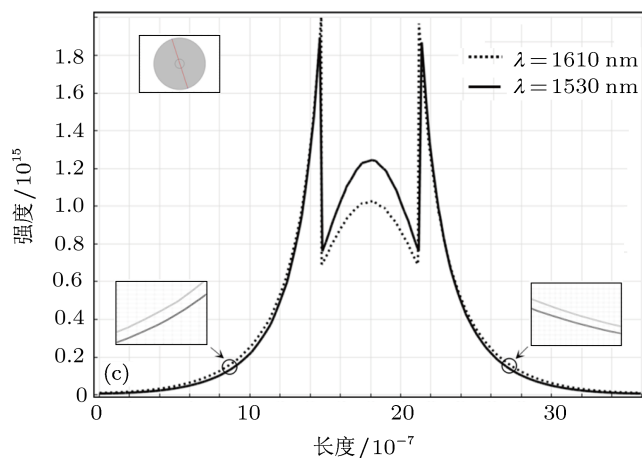
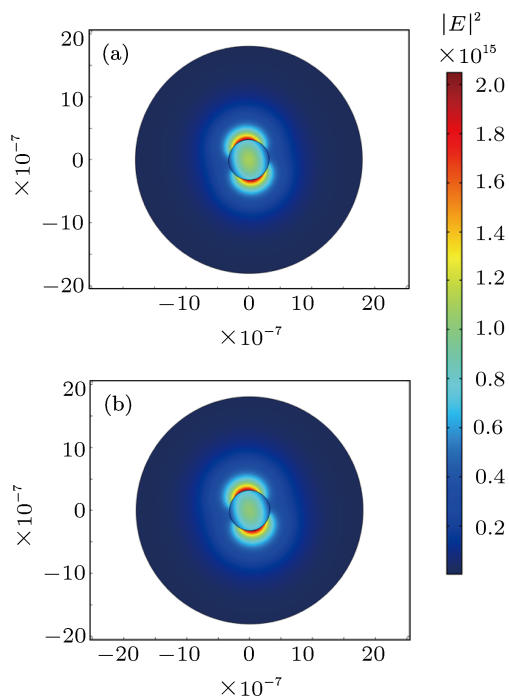


图 5 不同波长时的数值模拟 (a) $\lambda = 1530 \text{ nm}$ 的光场分布; (b) $\lambda = 1610 \text{ nm}$ 的光场分布; (c) 截线处的光场能量图

3 结论

提出了一种基于光环形器的 MNF 端面反射特性测量方法, 结合气凝胶固定和补偿法, 实验测量了由标准单模光纤拉制的 MNF 的端面反射率与其直径和传输波长之间变化关系, 结果与数值模拟结

论相一致, 表明该方法用于 MNF 端面反射特性测量的有效性. 利用该测量方法, 既可以实验测量特定 MNF 端面的反射率, 也可以研究其与各个影响因素之间的关系, 这对于设计制作 MNF 激光器、放大器和耦合器等微型器件方面具有重要意义.

- [1] Tong L M, Sumetsky M 2009 *Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Fibers* (Zhejiang: Zhejiang University Press)
- [2] Bures J, Ghosh R 1999 *Opt. Soc. Am. A* **16** 1992
- [3] Bilalbegovic G 2006 *J. Phys.* **18** 3829
- [4] Tong L M, Pan X Y 2007 *Physics* **36** 626 (in Chinese) [童利民, 潘行云 2007 物理 **36** 626]
- [5] Silva E C C M, Tong L M, Yip S, Vliet K J V 2006 *Small* **2** 239
- [6] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [7] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104221 (in Chinese) [梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海 2011 物理学报 **60** 104221]
- [8] Kou J L, Feng J, Ye L, Xu F, Lu Y Q 2010 *Opt. Express* **18** 14245
- [9] Gu F X, Zhang L, Yin X F, Tong L M 2008 *Nano Lett.* **8** 2757
- [10] Maslov A V, Ning C Z 2004 *IEEE* **40** 1389
- [11] Van L V, Rühle S, Vanmaekelbergh D 2006 *Nano Lett.* **6** 2707
- [12] Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M, Hale A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161108
- [13] Wang S S, Fu J, Qiu M, Huang K J, Ma Z, Tong L M 2008 *Opt. Express* **16** 8887
- [14] Wang S S, Hu Z F, Yu H K, Fang W, Qiu M, Tong L M 2009 *Opt. Express* **17** 10881
- [15] Pu S L, Chen X F, Chen Y P, Liao W J, Chen L J, Xia Y X 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 171904
- [16] Hou J P, Gai S L, Li P, Ning T, Hao J P, Zhao J L 2010 *Semiconductor Optoelectronics* **31** 747 (in Chinese) [侯建平, 盖双龙, 李鹏, 宁韬, 郝建苹, 赵建林 2010 半导体光电 **31** 747]
- [17] Hao J P, Hou J P, Zhao C Y, Zhao J L 2012 *Semiconductor Optoelectronics* **33** 62 (in Chinese) [郝建苹, 侯建平, 赵晨阳, 赵建林 2012 半导体光电 **33** 62]

Measurement of end-face reflection property of micro-nano fibers*

Hou Jian-Ping[†] Zhao Chen-Yang Yang Nan Hao Jian-Ping Zhao Jian-Lin

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, The Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 25 December 2012; revised manuscript received 25 January 2013)

Abstract

The end-face reflection property of micro-nano fiber (MNF) is one of its important transmission features, which plays remarkable roles in a variety of practical applications of MNF. In this paper, we propose a novel method to study the MNF end-face reflection property using an optical circulator, which overcomes the deficiencies of the direct measurement relying on a 3 dB coupler. On the basis of this method, we further introduce the aerogel fixing and power compensation techniques to effectively eliminate the errors caused by MNF pigtail floating, the light source output instability and internal loss. Therefore, the whole experimental design improves the measurement accuracy. The MNF end-face reflections with respect to the diameter of MNF and the wavelength of the guided light are investigated. The experimental results are in good agreement with simulation results, showing that this new approach is reliable for measuring the reflectivity of specific MNF. This detailed investigation on the end-face reflection versus various factors will be conducive to the constructions of versatile micro-nano scale devices based on the MNF, such as the MNF lasers, MNF amplifiers, MNF couplers and MNF filters.

Keywords: fiber optics, micro-nano fiber, end-face reflection, optical circulator

PACS: 42.81.-i, 81.07.Gf, 78.68.+m, 07.60.Vg

DOI: 10.7498/aps.62.144216

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921902).

[†] Corresponding author. E-mail: houjp@nwpu.edu.cn