

基于微纳光纤倏逝场的传感技术研究

宋章启 卫正统 张学亮 于洋 孟洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 微纳光纤的大倏逝场在光纤传感领域具有巨大应用前景。分析了微纳光纤拉制过程中影响外形控制的因素。通过改进拉制工艺和合理设置参数来提高微纳光纤外形结构控制精度, 实测两根微纳光纤外形结构, 表现出良好的一致性。理论仿真了吸附微颗粒与微纳光纤附加损耗的关系, 实现了对空气中微颗粒吸附过程的在线监测及对吸附 $2\ \mu\text{m}$ 直径氧化铝颗粒的计数功能。分析了液体吸收系数与微纳光纤附加损耗的关系, 通过测量微纳光纤传输附加损耗, 实现了对不同液体吸收系数的测试。

关键词 微纳光纤; 倏逝场; 微颗粒; 吸收系数

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s105005

Research on Sensing Technologies Based on Optical Micro-Nano Fiber Evanescent Field

Song Zhangqi Wei Zhengtong Zhang Xueliang Yu Yang Meng Zhou

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

Abstract The large evanescent field of optical micro-nano fiber (OMF) has enormous prospect in optical fiber sensing. In this paper, the factors that affect OMFs profile during tapering process are analyzed. Accurate OMFs profile can be tapered by improved art and choosing proper parameters. Two OMFs is tapered and their profiles coincide well. The relationship between adhered particulates and additional loss of OMF is theoretically simulated, and the corresponding experiments are carried out by using dust in air and $2\ \mu\text{m}$ -in-diameter alumina particulates. The relationship between absorption coefficient of liquid and additional loss of OMF is also calculated, and the absorption coefficient of different kinds of liquids are tested.

Key words optical micro-nano fiber; evanescent field; particulate; absorption coefficient

OCIS codes 060.2310; 060.2280; 060.2370

1 引言

微纳光纤作为光波长尺度的波导纤维具有低传输损耗、高功率密度、大倏逝场和小弯曲半径等特点, 在微尺度的光传输、耦合、调制、谐振、放大、传感等领域具有潜在的应用价值。2003 年, 童利民等^[1-2]提出两步拉伸法, 获得了直径均匀且小于 50 nm 的微纳光纤。2004 年 Brambilla 等^[3]通过改进工艺, 得到了低损耗微纳光纤, 对于直径为 750 nm 微纳光纤, 其损耗低于 0.02 dB/mm。低损耗、高质量微纳光纤的成功制作, 使其在光纤传感领

域的应用研究范围不断扩大^[4-6], 十年来受到了广泛的关注, 大家已在湿度、折射率、温度、气体及电流等传感方向开展了深入研究^[7-11]。

大倏逝场是微纳光纤的一个重要特性。一方面大倏逝场使得微纳光纤间的光场耦合非常容易。利用这一特点可以方便地构成微纳光纤环形谐振腔、结型谐振腔和三维立体谐振腔, 给光学谐振腔构建带来了革命性变化; 利用微纳光纤的大倏逝场特性, 还可以制成微纳光纤光栅, 它不仅具有普通光纤光栅的光谱响应特性, 而且能够利用倏逝场增强与外

收稿日期: 2013-07-10; 收到修改稿日期: 2013-10-10

作者简介: 宋章启(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: songzhangqi@nudt.edu.cn
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

界环境的相互作用,扩大其应有范围。另一方面,微纳光纤的大倏逝场,增加了光场与外界物质的相互作用。可以直接通过处于微纳光纤倏逝场范围内的微粒对传输光场进行调制,或者通过测量微纳光纤传输光场特性的变化,实现对微颗粒的测量。早期研究主要关注微颗粒物对微纳光纤传输损耗的影响,提出了微纳光纤的封装与保护方法。本文作者提出了基于微纳光纤倏逝场的微颗粒污染物检测概念,对微颗粒引起的微纳光纤倏逝场散射特性进行了分析,得到了微纳光纤散射损耗随微颗粒直径和折射率变化的规律,实验研究证明了基于微纳光纤倏逝场对微颗粒污染进行检测的可能性^[12]。

本文在前期研究的基础上,开展了微纳光纤制备工艺的改进研究,提升微纳光纤制作的一致性,分析了微颗粒污染物对微纳光纤倏逝场的影响,进行基于微纳光纤的吸附微颗粒传感研究;对利用微纳光纤倏逝场测量液体吸收系数进行了实验研究。

2 微纳光纤拉制工艺改进

微纳光纤倏逝场分布与其外形结构密切相关。微纳光纤用于传感研究时,其外形结构,尤其是均匀区域直径对传感器灵敏度影响很大;在非线性波长变换研究过程中,微纳光纤直径是否满足特定波长的相位匹配条件,是能否提高转换效率的关键^[13]。因此,制备的微纳光纤外形结构应符合设计要求。但是,在微纳光纤的实际拉制过程中,拉伸电机往复运动上百次,光纤直径一般从百微米量级减小到微米量级,相应的横截面积更是减小为原来的

1/10000,拉制过程中任何微小误差因素都会被累积,最终都将对微纳光纤的外形结构造成重要影响。拉制过程中的影响因素主要有:电机位置误差,微加热头温度分布稳定性,光纤自重,空气湍流和环境温度等外界因素。其中重力导致的拉制光纤下垂,使拉伸长度大于设计长度;微加热头和外界环境的影响主要导致有效加热长度的变化,造成非均匀带状加热而非点加热,最终造成微纳光纤外形结构与设计结构的差异。

在不考虑非理想因素情况下,按程序设计一根均匀区域长度为 4 mm、直径为 30 μm 、线性变化因子 $\alpha=0$ 的微纳光纤,其设计的理想外形结构纵向分布如图 1(a)中实线所示,而实际得到的外形结构纵向分布如图 1(a)中圆圈所示。可见,由于非理想因素的影响,实际获得的微纳光纤外形结构与设计的微纳光纤外形结构有明显差异,均匀区直径比设计值大了近 30%,锥区明显变长。经过分析和优化后,先后按同一参数(直径为 1.5 μm ,均匀区域长度为 10 mm,线性变化因子 $\alpha=0.02$)拉制了两根微纳光纤,实测两根微纳光纤的外形结构与理论外形结构的差异如图 1(b)所示。两次拉制的微纳光纤的实际外形结构与设计外形基本一致,且两次得到的实验结果重合性很好。可见,通过调整参数后制备的微纳光纤实际外形结构得到了很好的控制。这样既可实现拉制微纳光纤实际结构与设计值一致,又可使不同批次拉制的微纳光纤结构一致,为微纳光纤传感器实现工程应用奠定了良好的技术基础。

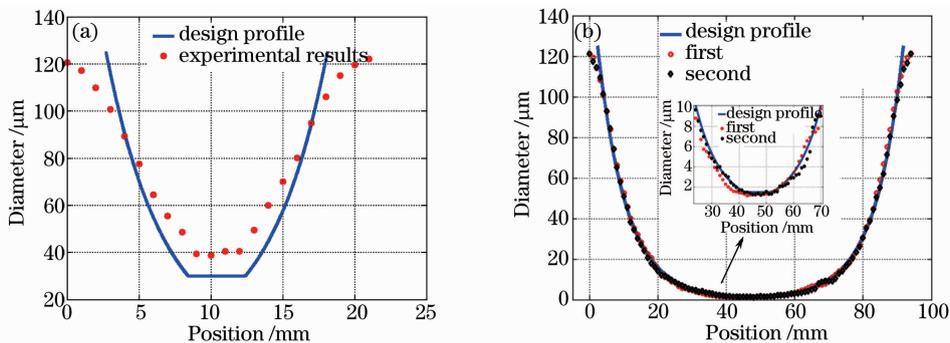


图 1 实际微纳光纤外形与理论设计外形之间的差异。(a) 改进工艺前;(b) 改进工艺后
Fig. 1 Difference of optical micro-nano fiber between experimental results and theoretical design.

(a) Original art; (b) improved art

3 微颗粒传感

由于范德瓦尔斯力和静电吸引力的共同作用,周围环境中的微颗粒污染物容易吸附在微纳光纤

上,对传输光倏逝场造成扰动,最终产生附加传输损耗。通过记录传输损耗变化情况可以对基于微纳光纤倏逝场的微颗粒污染进行监测。

首先需要找出吸附的微颗粒与微纳光纤附加损耗的关系。通过使用三维的时域有限差分(FDTD)算法对有微颗粒处于微纳光纤倏逝场时的复杂光场传输和散射问题进行仿真分析。将正交网格的大小设为工作波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的 $1/40$, 仿真区域的周围是完美匹配层。通过比较微颗粒吸附前后输出光能量

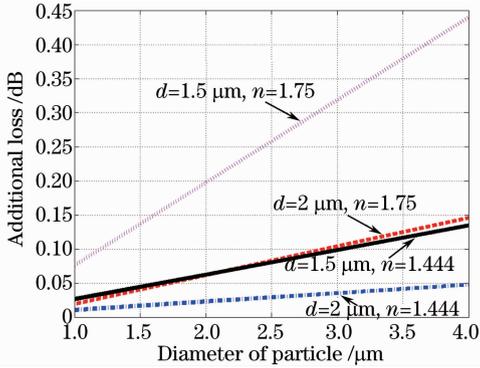


图2 附加损耗和颗粒污染物直径之间的关系

Fig. 2 Additional loss plotted against diameter of contaminant particle

的变化,得到附加传输损耗,结果如图2所示。仿真结果显示,当颗粒污染物直径 D 和折射率 n 相同的情况下,微纳光纤直径 d 越小,微颗粒污染物引起的附加损耗越大;在相同的微纳光纤直径和相同的颗粒污染物直径情况下,颗粒污染物的折射率越大,引起的附加损耗越大;由微颗粒污染物附着引起的微纳光纤传输附加损耗与颗粒直径成正比。

为了验证微纳光纤微颗粒传感的可行性,采用如图3所示的实验系统进行实验研究。半导体激光器发出的光通过光隔离器后由一个3 dB耦合器分为两束,其中一束通过微纳光纤后连接探测器1,另外一束作为参考光,用于消除光源自身功率的波动,直接连接探测器2。实验中用到的光源为美国RIO半导体光源(输出波长为 $1.55 \mu\text{m}$),探测器为德国FEMTO公司生产的OE-200-IN2-FC型低噪声光电探测器。两个探测器输出信号通过NI公司生产的6221型采集卡转换为数字信号,并进行比较,消除光源的光强波动影响。并在光学显微镜下观察微纳光纤吸附颗粒情况。

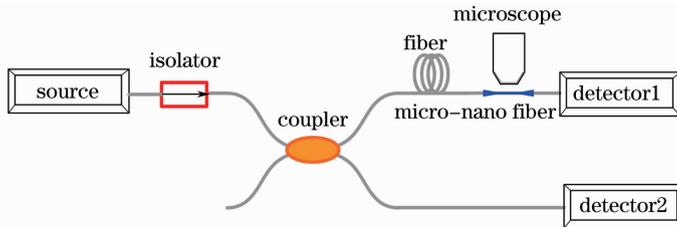


图3 基于微纳光纤的微颗粒传感实验结构图

Fig. 3 Experimental setup of particulate sensing based on optical micro-nano fiber

将微纳光纤传感头置于实验室环境,实时记录比较输出结果。图4所示为其中30 min测试结果。系统记录到三次较为明显的输出光功率跳变,其功率衰减大小分别约为0.01、0.04、0.02 dB,在图中分别标记为A、B、C,三次跳变对应颗粒吸附的状态分别如其右侧显微镜照片所示。由于空气中悬浮颗粒的主要成分为二氧化硅,其折射率在工作波长处约为1.444。根据仿真结果,当颗粒折射率为1.444,微纳光纤直径为 $2 \mu\text{m}$ 时,A、B、C三点对应的微颗粒直径尺寸约为 $1 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$,与显微测量结果基本相符。此外,除了A、B、C三点功率跳变外,在图4的B、C点之间及C点之后,输出光功率有持续的衰减过程。该过程可能是由多个直径更小的颗粒吸附的共同结果,其引起的功率跳变淹没在本底噪声之中。

为了进一步验证微纳光纤对吸附颗粒的监测能力,使用氧化铝颗粒进行测试实验。氧化铝颗粒直

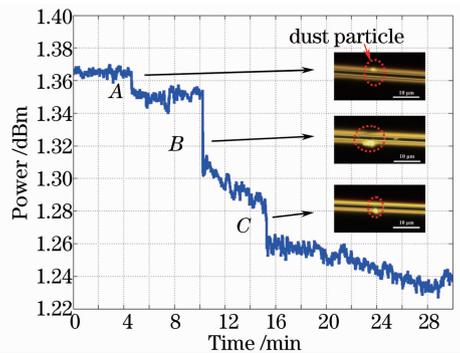


图4 基于微纳光纤进行颗粒传感的测试结果

Fig. 4 Experimental result of particulate sensing based on optical micro-nano fiber

径约为 $2 \mu\text{m}$,在 $1.55 \mu\text{m}$ 工作波长处的折射率为1.75。在实验过程中,使微纳光纤均匀区域吸附氧化铝颗粒。在图5中,圆圈代表实际测得的实验数据,直线为根据附加损耗仿真得到的微颗粒数量。图中右下角为吸附氧化铝颗粒的微纳光纤显微图,

可以看到颗粒直径约为 $2\ \mu\text{m}$, 微纳光纤直径也为 $2\ \mu\text{m}$ 。实验结果与理论结果基本一致, 但有一定的波动, 原因可能是氧化铝样品颗粒的直径不均匀且形状为非规则球形。

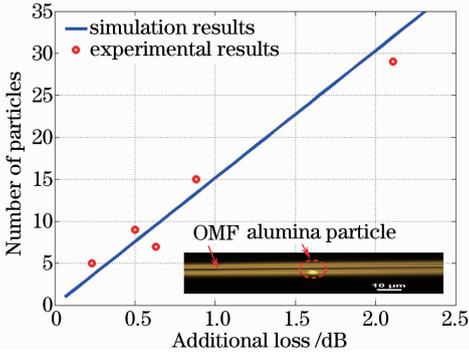


图 5 吸附氧化铝颗粒个数和附加损耗的关系
Fig. 5 Number of alumina particles plotted against additional loss

4 液体吸收系数监测

吸收系数测量在化学、生物、航天以及远程遥感领域有重要应用^[16-17]。利用微纳光纤体积小、倏逝场大的特点, 可以将光引到液体内的特定位置, 测量其吸收系数的动态变化情况。利用微纳光纤进行低折射率液体吸收系数测量, 只需要很小的样品量, 而且可以通过改变微纳光纤的直径和长度从而方便地调整探测灵敏度。使用微纳光纤进行液体吸收系数分析的基本思路是: 当微纳光纤浸入待测液体中时, 液体与微纳光纤构成双层圆柱形阶跃光波导, 液体相当于无限大包层, 微纳光纤则为纤芯。根据波导理论可知, 有相当部分能量以倏逝场的形式存在于微纳光纤的物理边界之外, 可以与周围液体充分接触; 由于包层部分液体对传输光有吸收作用会增加微纳光纤的传输损耗。根据微纳光纤的附加损耗及倏逝场能量比例, 推导出该液体的吸收系数。通过

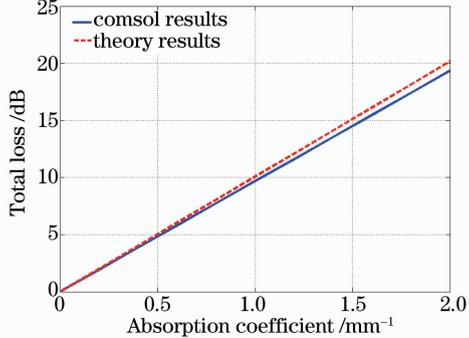


图 6 吸收系数与附加损耗关系
Fig. 6 Total loss plotted against liquid absorption coefficient

使用两层波导近似算法和 COMSOL 软件计算两种方法, 得到了吸收系数和附加损耗的关系, 如图 6 所示。微纳光纤均匀区域直径为 $2\ \mu\text{m}$, 均匀区域长度为 $8\ \text{mm}$, α 为 0.2 , 液体为水, 折射率计为 1.33 , 微纳光纤折射率为 1.451 , 传输光波为 $1.55\ \mu\text{m}$ 。在相同微纳光纤结构参数情况下, 液体吸收系数越大, 最终对应的总损耗越大, 且总损耗大小与液体吸收系数在所计算的范围内基本呈线性关系。

为了验证基于微纳光纤测试液体吸收系数的可行性, 构建了测试系统, 如图 7 所示。其中, 光源为由掺铒光纤制成的自发辐射光源, 光谱范围为 $1525\sim 1565\ \text{nm}$ 。自发辐射光经过隔离器后, 通过微纳光纤, 输出光由光谱仪进行测量。实验中使用的微纳光纤直径为 $1.8\ \mu\text{m}$, 均匀区域长度为 $10\ \text{mm}$, α 值为 0.2 。通过对比浸入纯水前后光谱的变化情况, 可以得到由于纯水的吸收作用造成微纳光纤的附加损耗。将微纳光纤浸入乙醇溶液冲洗后, 微纳光纤附加损耗可以恢复初始值, 接着重复上述实验步骤, 得到用微纳光纤浸入盐水(质量浓度 $0.01\ \text{g/ml}$)及饮用水时, 微纳光纤对应的附加损耗。该实验过程中, 环境温度为 $14\ ^\circ\text{C}$ 。得到的实验结果如图 8 所示。

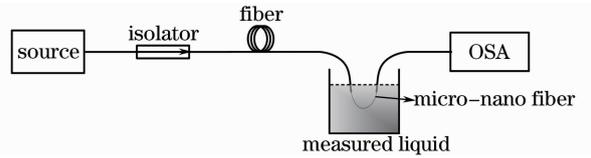


图 7 微纳光纤测试纯水吸收系数系统结构图
Fig. 7 Experimental setup of absorption coefficient measurement

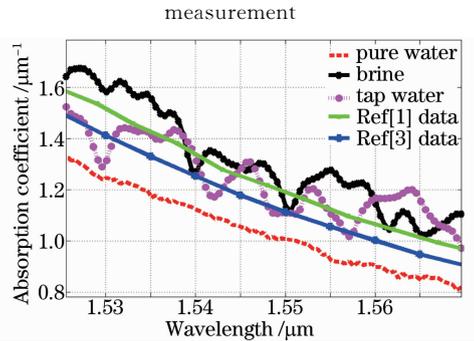


图 8 三种液体得到的吸收系数随波长变化情况
Fig. 8 Absorption coefficients of three different liquids versus wavelength

当微纳光纤分别浸入纯水、盐水及饮用水时, 对应的光纤附加损耗是不同的。根据得到的附加损耗以及关于吸收系数传感的理论, 可以得到不同液体对应的吸收系数。通过对比微纳光纤在三种液体的

附加损耗随波长的变化,发现纯水对应的附加损耗最小,且在所测波长范围内无明显吸收峰,而盐水和饮用水由于存在杂质,因此可以观察到明显的吸收峰。图中绿色实线为参考文献[14]给出的某样品水测试结果,蓝色实线为参考文献[15]给出的纯水测试结果。三者测试结果的趋势是完全一致,但存在差异,主要原因是实验中使用的样本纯净度不同。Kou 实验过程中使用的纯水为蒸馏水,Deng 实验过程中使用的为中国海洋研究中心提供的纯水,本实验中使用的纯水为高品质去离子水;另外实验过程中所处的环境温度也不同。本实验过程中,环境温度为 14 °C,Kou 和 Deng 实验过程中环境温度分别是 25 °C 和 26 °C。不同的实验温度将得到不同的测试吸收系数。

利用水的吸收系数随温度变化的特点,微纳光纤可用于温度传感。两根直径分别为 1.7 μm 和 2.4 μm 的微纳光纤,均匀区域长度均为 10 mm, α 为 0.2,作为测试用微纳光纤。使用纯水作为实验液体,得到了附加损耗和温度的关系,如图 9 所示。1.7 μm 直径微纳光纤得到的实验结果用圆圈表示,2.4 μm 微纳光纤得到的实验结果用菱形表示。两根微纳光纤得到的实验结果均进行了线性拟合,拟合曲线的线性度均优于 0.998。如果根据微纳光纤附加损耗进行温度传感,直径为 1.7 μm 的微纳光纤温度灵敏度为 $-0.083 \text{ dB}/^\circ\text{C}$,高于直径为 2.4 μm 的微纳光纤灵敏度,其值为 $-0.038 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 。整个系统的本底噪声为 0.005 dB,所以对于直径为 1.7 μm 的微纳光纤,其最小可测温度为 0.06 °C,对于直径为 2.4 μm 的微纳光纤,其最小可测温度为 0.13 °C。如果需要更高的温度灵敏度,可以选择更细的微纳光纤和均匀区域更长的微纳光纤。

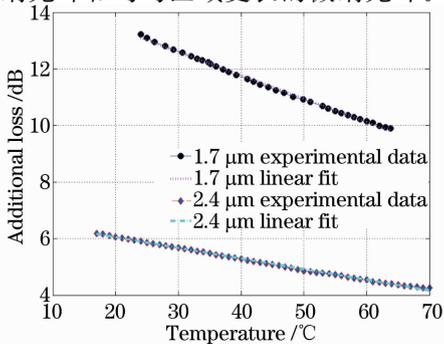


图 9 附加损耗随纯水温度的变化

Fig. 9 Additional loss plotted against the temperature of pure water

5 结 论

分析了影响微纳光纤制作精度的关键因素,并通过合理调整拉制参数提升微纳光纤制作的一致性,实测微纳光纤的外形结构与设计要求符合良好,将微纳光纤用于微颗粒传感研究,通过将其置于空气中监测及 2 μm 直径氧化铝颗粒吸附实验,证明了其进行微颗粒传感的可行性。提出了基于微纳光纤倏逝场进行液体吸收系数分析的实验方案,并理论分析了附加损耗和吸收系数之间的关系,根据实验结果与参考结果之间的差异,发现了吸收系数随温度变化的重要原因。并进行了基于微纳光纤的附加损耗与吸收系数关系温度传感研究,实验研究发现纯水吸收系数与温度线性相关。据此,提出基于微纳光纤附加损耗的温度传感方案,实验结果线性度优于 0.998,最小可测温度变化可达 0.06 °C。综上所述,在获得优良一致性的微纳光纤的基础上,基于微纳光纤倏逝场特性,预期可用于特殊环境微颗粒污染监测、水吸收系数分析以及温度传感等方面。

参 考 文 献

- 1 Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816–819.
- 2 Tong L M, Lou J Y, Ye Z Z, *et al.*. Self-modulated taper drawing of silica nanowires [J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(9): 1445–1448.
- 3 G Brambilla, Vittoria Finazzi, David J Richardson. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers [J]. *Opt Express*, 2004, 12(10): 2258–2263.
- 4 G Brambilla. Optical fibre nanowires and microwires: a review [J]. *J Opt*, 2010, 12(4): 1–19.
- 5 M Sumetsky. Optical fiber microcoil resonators [J]. *Opt Express*, 2004, 12(10): 2303–2316.
- 6 Zhao Zheming, Wu Pinghui, Sui Chenghua, *et al.*. A novel microfiber sensor based on white light interferometer [J]. *Chinese J Laser*, 2010, 37(8): 2001–2004.
赵浙明, 吴平辉, 隋成华, 等. 基于白光干涉的新型微纳光纤传感器 [J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2001–2004.
- 7 Lei Zhang, Fuxing Gu, Jingyi Lou, *et al.*. Fast detection of humidity with a subwavelength-diameter fiber taper coated with gelatin film [J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13349–13353.
- 8 Heng Zhu, Yuqing Wang, Baojun Li. Tunable refractive index sensor with ultracompact structure twisted by poly (trimethylene terephthalate) nanowires [J]. *Acs Nano*, 2009, 3(10): 3110–3114.
- 9 M Z Muhammad, A A Jasim, H Ahmad, *et al.*. Non-adiabatic silica microfiber for strain and temperature sensors [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2013, 192: 130–132.
- 10 He Hualong, Feng Guoying, Deng Guoliang, *et al.*. Improvement of the beam quality factor by using tapered micro/nano fiber [J]. *Chinese J Laser*, 2011, 38(8): 0805008.
何华龙, 冯国英, 邓国亮, 等. 微纳光纤改善光束质量的研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0805008.
- 11 M Belal, Z Song, Y Jung, *et al.*. Optical fiber microwire current sensor [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 3045–3047.

- 12 Zhengtong Wei, Zhangqi Song, Xueliang Zhang, *et al.*. Microparticle detection with optical microfibers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(6): 568–571.
- 13 Rafael R Gattass, Geoffry T Svacha, Limin Tong, *et al.*. Supercontinuum generation in submicrometer diameter silica fibers[J]. Opt Express, 2006, 14(20): 9408–9414.
- 14 Kou L H, Labre D, Chylek P. Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5- μm spectral range[J]. Appl Opt, 1993, 32(19): 3531–3540.
- 15 Deng Ruru, He Yingqing, Qin Yan, *et al.*. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900~2500 nm)[J]. J Remote Sens, 2012, 16(1): 192–206.
- 16 Bertie J E, Keefe C D. Infrared intensities of liquids XXIV: optical constants of liquid benzene-h₆ at 25 °C extended to 11.5 cm⁻¹ and molar polarizabilities and integrated intensities of benzene-h₆ between 6200 and 11.5 cm⁻¹[J]. J Mol Struct, 2004, 695-696: 39–57.
- 17 Shen Y C, Lu Z H, Spiers S. Measurement of the optical absorption coefficient of liquid by use of a time-resolved photoacoustic technique[J]. Appl Opt, 2000, 39(22): 4007–4012.

栏目编辑:张 腾