

文章编号: 1001-3806(2013)01-0101-04

飞秒激光制备光纤微孔传感器

柏玲 赵秀丽* 刘一曲 士良 李岩

(哈尔滨工业大学(威海)理学院 光电科学系 威海 264209)

摘要: 为了实现高精度、低成本的液体折射率测量,采用飞秒激光水辅助微加工技术,制备出一种基于微孔结构的单模光纤液体折射率传感器。研究了传感器的传输损耗与孔内液体折射率及微孔长度的关系,利用射线理论分析了传感的机理,讨论了温度对传感器性能的影响。结果表明,该传感器在折射率 1.333~1.413 区间具有良好的线性响应,灵敏度达到 157.48dB/RIU,且不易受温度串扰。该传感器具有结构紧凑、制备简单、高灵敏度、温度不敏感和低成本等优点,在生物化学测量领域有着广泛的应用前景。

关键词: 光学器件; 光纤传感器; 飞秒激光; 微孔; 折射率; 分辨率

中图分类号: TN253; TP212.1*4 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.025

Optical fiber micro-hole sensor fabricated with femtosecond laser

BAI Ling, ZHAO Xiu-li, LIU Yi, QU Shi-liang, LI Yan

(Department of Optoelectronic Science, School of Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: In order to measure refractive index of liquid with high-precision and low-cost, a liquid refractive index sensor based on a micro-hole in the single-mode fiber was fabricated by means of water-assisted femtosecond laser ablation method. The responses of transmission loss of the sensor to the refractive index and micro-hole length were investigated. Based on the ray theory, the sensing mechanism was analyzed. The effect of temperature disturbance on the sensor performance was also discussed. The experiment results show that the sensor has a good linear response in the refractive index range of 1.333~1.413, the sensitivity of the sensor can achieve 157.48dB/RIU and it is less susceptible to temperature change. Compared with other fiber refractive index sensors, optical fiber micro-hole sensors have the outstanding advantages, including compact, easy to fabricate, high sensitivity insensitive to temperature and low cost, etc. Therefore optical fiber micro-hole sensors can have extensive application in the fields of biochemical measurement.

Key words: optical devices; optical fiber sensor; femtosecond laser; micro-hole; refractive index; resolution

引言

光纤折射率传感器因具有体积小、质量轻、抗干扰能力强、便于实时监测和远程测量等优点,在环境监测、医疗及化学分析等领域有着广泛的应用前景^[1-2]。目前在实际应用方面,利用光功率变化进行折射率测量的光纤传感器主要有两种类型:一种是利用消逝场理论对液体折射率进行测量^[3],这类传感器通常是光纤包层的一部分腐蚀掉,使光信号对外界折射率变

化更加敏感,但是此种类型的传感器仍然存在着灵敏度不高、易受温度串扰、机械强度差以及加工工艺复杂等缺陷;另一种则是利用飞秒激光在光纤纤芯中直接烧蚀出一个微孔或微通道^[4-5],其虽然解决了温度串扰问题,但灵敏度不高,制备出的结构在长度以及形状方面有很大限制。

近年来,利用飞秒激光水辅助微加工技术已经成功地在石英玻璃中制备出3维微通道结构^[6-7]。加工过程中产生的冲击波和高速水流能够诱导材料的空蚀损伤^[8-9],在材料中制备出3维微孔或微通道。高速流动的水流还能够及时清除空腔结构内部的杂质,确保飞秒激光与水作用产生的冲击波能够连续地击穿材料,制备出性能优良的空腔结构。结合高精度移动控制平台,可以利用飞秒激光水辅助方法在光纤内制备复杂的微孔结构,加工精度高,加工区域洁净光滑。

作者采用飞秒激光水辅助微加工方法,在普通单模光纤中制备出一个“L”型微孔,基于这种微孔结构

基金项目:威海市科技发展计划资助项目(2011DXGJ01);哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT.NSRIF.201008);哈尔滨工业大学(威海)博士启动基金资助项目(HIT(WH)YJRe201002)

作者简介:柏玲(1987-),女,硕士研究生,现主要从事光纤光学器件的飞秒激光微加工的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xlzhaohit@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-04-27;收到修改稿日期:2012-06-01

得到单模光纤折射率传感器。这种器件结构紧凑、加工工艺简单。本文中研究了液体折射率及微孔长度对该器件传输损耗的影响,结果表明,这种传感器在测量折射率小于 1.41 的液体时具有较高的灵敏度,且对温度不敏感,因此,能够弥补传统光纤折射率传感器的缺点,在生物、化学、医学等传感领域有着良好的应用前景。

1 实验

实验装置如图 1 所示。实验中使用的飞秒激光器是输出波长为 800nm、脉冲宽度为 120fs、重复频率为 1kHz 的钛蓝宝石飞秒激光再生放大系统。实验中采用康宁普通单模光纤 SMF28,纤芯直径为 $8.2\mu\text{m}$, 1550nm 处的有效折射率为 1.4682。将去除涂覆层的光纤样品固定在 3 维移动平台上,用一个盖玻片(厚度 0.2mm)将样品压紧并滴入蒸馏水。光纤两端分别连接宽带光源(broad band source, BBS)(波长范围 1200nm ~ 1700nm)和光谱仪(optical spectrum analyzer, OSA)(YOKOGAWA, AQ6370B),激光脉冲能量通过衰减片进行调节,激光脉冲的曝光时间通过机械快门(响应时间 100ms)进行控制。

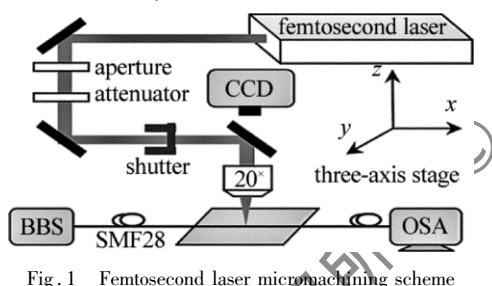


Fig. 1 Femtosecond laser micromachining scheme

飞秒激光经 20 倍显微物镜(数值孔径为 0.45)聚焦到纤芯所在的平面,用计算机控制 3 维移动平台,使激光焦点在这个平面上沿 x - y 轴移动,首先令其从一侧的包层边缘进入光纤,利用水流冲击作用在光纤内钻孔,同时由孔内排出的水流将孔内的杂质及时排除。当激光焦点抵达纤芯的正中心后沿纤芯行进一段距离,通过这样的加工过程,最终在光纤上得到一个“L”型微孔。

微孔的尺寸、形状、内壁光滑程度与激光脉冲能量、扫描速率、激光焦点光斑大小密切相关。为了获得质量较好的微孔,分别研究了不同激光脉冲功率、扫描速率和聚焦前激光光斑大小对微孔加工质量的影响。实验结果证实,当激光脉冲平均功率为 4.4mW、扫描速率为 $10\mu\text{m/s}$ 、聚焦前激光光斑为 2mm 时制备出的微孔质量最佳,如图 2 所示。图 2a、图 2b 中分别给出了微孔的正面以及旋转 90° 后的侧面光学显微照片,微孔横贯纤芯部分的长度用参量 L 表示。从图中可以

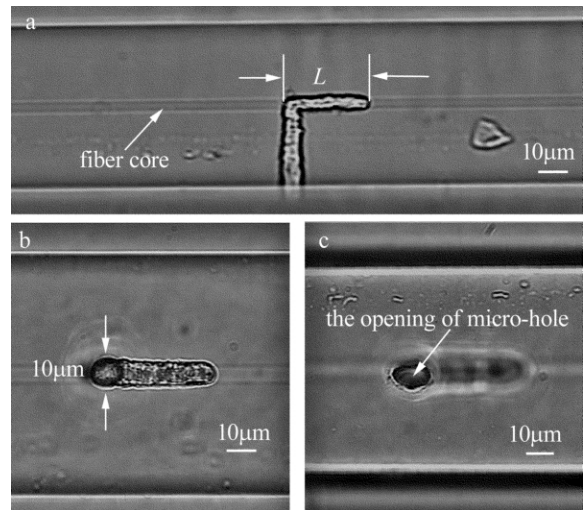


Fig. 2 Microscope images of the micro-hole

a—the top view image of the micro-hole b—the front view image of the micro-hole c—the opening of micro-hole on the side of fiber

明显地看出,制备出的微孔恰好通过光纤纤芯,微孔近似呈圆形,直径为 $10\mu\text{m}$ 。

实验中利用上述加工参量制备了 L 为 $10\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ 的 3 个样品,分别命名为 L_{10} , L_{30} 和 L_{50} 。样品制备后依次用丙酮、酒精、去离子水超声浴清洗,晾干,然后用光谱仪记录浸泡于不同折射率液中的透射谱。每次测量后,都用酒精将样品清洗干净,直到样品透射谱恢复到空气中的透射谱为止。

2 结果与讨论

如图 3a、图 3b、图 3c 所示,3 种不同孔长的样品 L_{10} , L_{30} , L_{50} 在波长 1310nm, 1400nm, 1450nm, 1500nm 和 1550nm 处的传输损耗随溶液折射率的变化曲线。由图可知,当孔内折射率相同时,样品的传输损耗随波长变化有一定起伏,这是由不同波长的光被孔内溶液吸收和散射掉的能量不等引起的。此外,还可以看出,在折射率 1.333 ~ 1.413 范围内各个波长处样品传输损耗随溶液折射率的变化趋势大体一致,说明波长对传输损耗与折射率关系影响不大,因此,选择通信波长 1550nm 处对样品传输损耗随溶液折射率的变化进行分析。图 3d 中给出了 3 种样品在波长 1550nm 时的传输损耗随折射率的变化曲线。当微孔内待测液体的折射率从 1.333 增加到 1.413 时,样品 L_{10} 的传输损耗随孔内溶液折射率的增加迅速降低,二者近似呈线性关系。样品的灵敏度可由损耗随折射率变化的斜率获得,通过线性拟合,计算得出样品 L_{10} 在该区间上的平均灵敏度为 29.6dB/RIU(其中 RIU(refractive index unit)为单位折射率)。与样品 L_{10} 类似,样品 L_{30} 和 L_{50} 在折射率 1.333 ~ 1.413 区间同样表现出良好的线性响应,而且平均灵敏度更高,分别达到 99.5dB/RIU 和

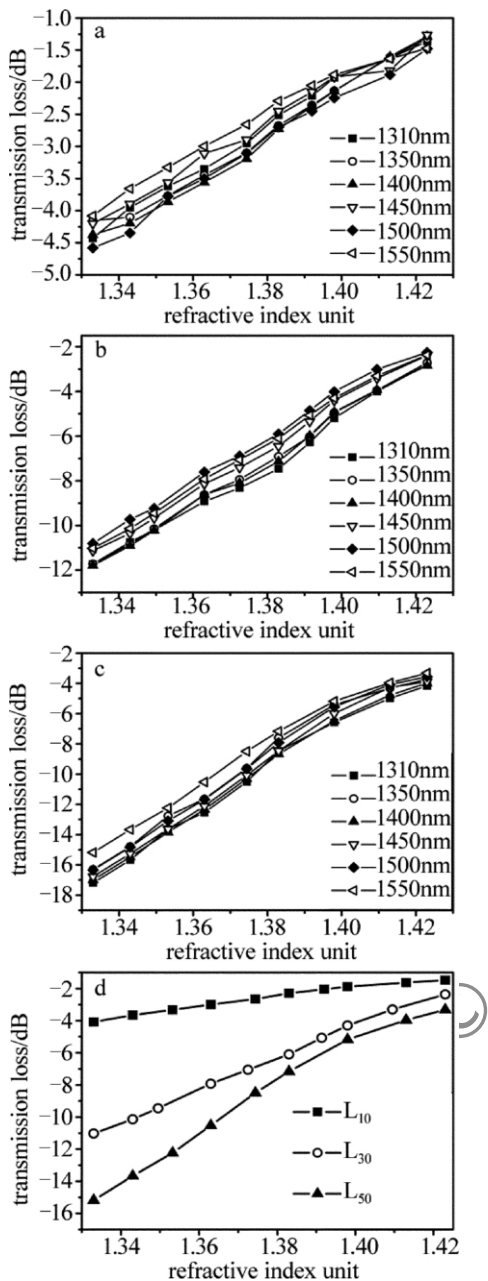


Fig. 3 a ~ c—curves for the relationship of sample L_{10} , L_{30} , L_{50} transmission loss and refractive index change at the wavelength 1310nm, 1350nm, 1400nm, 1450nm, 1500nm and 1550nm d—curves for the relationship of sample transmission loss and refractive index change at the wavelength 1550nm

157.48dB/RIU.

从图 3 中还可以看出,传感器的微孔长度增大,损耗增大;待测液体折射率增大,损耗降低。作者制作微孔的尺寸为 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,当测试波长为 1550nm 时,可以采用射线光学理论,分析传感器的损耗与微孔长度和待测液体折射率的关系。

如图 4 所示,纤芯中传播的光经过微孔时,在孔与包层的边界处会发生折-反射现象,一部分光泄露进包层中损耗掉,另一部分光则反射回微孔内继续向前传播,在遇到边界后发生 2 次折-反射。根据公式:

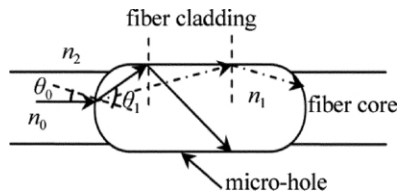


Fig. 4 Ray theory model of the micro-hole refractive index sensor

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0 \quad (1)$$

考虑第 1 种情况:当微孔内的折射率 n_1 增大时,入射角 θ_1 跟着变小,在确定长度的微孔内发生折-反射的次数会降低,进入包层中的能量降低,损失掉的光功率随之减少,所以,随着孔内折射率的不断增加,传感器的损耗逐渐降低。第 2 种情况:当孔内的折射率 n_1 不变时,微孔的长度增大,发生折-反射的次数增加,进入包层中光能量增大,因此器件的损耗就大。综上所述,当孔内待测溶液的折射率变化相同的 Δn 时,微孔越长的器件损耗掉的总功率越多,所以传感灵敏度也就高。利用射线理论很好地解释了实验结果,揭示了微孔光纤传感器的传感机制。需要注意的是:本研究中制作的单模光纤微孔折射率传感器,由于单模光纤的纤芯折射率大于待测液体折射率,传感器插入损耗稍大。

光纤传感器在测量液体折射率时通常受到温度的干扰,为了降低温度对传感器的影响,在制作测量液体折射率传感器时往往需要采用辅助手法,这不但增大了传感器的尺寸,而且制作复杂、性能不稳定、成本大大增加。

下面讨论作者制作的传感器受温度的影响情况。选择样品 L_{50} 进行水域加热,将样品放入充满蒸馏水的水槽中,控制水温从 10°C 开始上升,每升温 10°C 稳定 20min 之后进行测量,记录下样品在波长 1550nm 处传输损耗的变化,直至温度升到 90°C 为止。传输损耗随温度的变化曲线如图 5 中空心圆形点划线 1 所示。由于水的折射率随着温度的升高而降低^[10],对应引起的传输损耗随温度的变化关系如图 5a 中实心点划线 2 所示。曲线 1 和曲线 2 做差值,扣除水的折射率随温度变化对实验造成的影响,最终得到了样品 L_{50} 传输损耗随温度的变化关系,如图 5b 中实心点划线 3 所示。从图中可以看出,当水温从 10°C 上升到 90°C 时,样品由温度变化引起的损耗变化小于 0.3 dB。这说明该传感器对温度不敏感,因此,可以避免由于外界环境温度变化对折射率测量带来的影响。

应当指出的是,本实验制备的传感器存在着微弱的法布里-珀罗效应^[11],但是由于微孔的两个孔面平行度低,所以法布里-珀罗效应很弱。为了降低干涉现象对本实验的影响,这里只研究了长度在 $50\mu\text{m}$ 以下的微孔,而对于更长的微孔的研究有待于后续工作来实现。

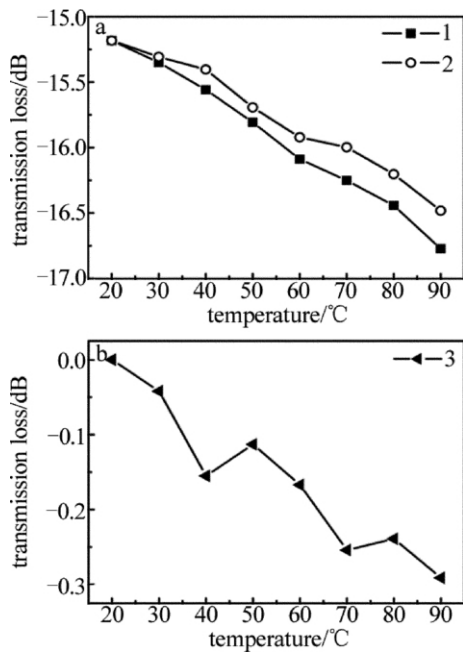


Fig. 5 Temperature response of the sample 1—temperature response of the sample before calibration; 2—temperature response of the sample with different refractive index of water; 3—temperature response of the sample after calibration

3 结论

采用飞秒激光水辅助微加工技术,制备出一种新型的单模光纤微孔折射率传感器,制备过程简单、传感器尺寸小。实验结果表明,该传感器的传输损耗与孔内溶液折射率近似呈线性关系,且波长对这种关系影响不大。随着微孔长度的增加,传感器折射率灵敏度逐渐增大。在折射率 1.333 ~ 1.413 区间所得最高灵敏度为 157.48dB/RIU,此传感器对环境温度不敏感。因此,这种传感器能够满足实际应用的需求,在生物、化

学、医学等传感领域有着良好的应用前景。

参考文献

- [1] KHIJWANIA S K, GUPTA B D. Fiber optic evanescent field absorption sensor: effect of fiber parameters and geometry of the probe[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1999, 31(8): 625-636.
- [2] ZHOU G L, E Sh L, DENG W Y. An optical fiber temperature sensor based on bending loss[J]. *Laser Technology*, 2009, 30(1): 46-49 (in Chinese).
- [3] ZHUANG X Y, WU Y H, XUA M, *et al.* Optical fiber evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1936-1941 (in Chinese).
- [4] LAI Y, ZHOU K, BENNION I, *et al.* Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2559-2561.
- [5] WANG Y, YANG M W, HONG W, *et al.* Refractive index sensor based on a microhole in single-mode fiber created by the use of femtosecond laser micromachining[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3328-3330.
- [6] LI Y, YAMADA K, WATANABE W, *et al.* Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(23): 1912-1914.
- [7] LI Y, QU Sh L. Femtosecond laser-induced breakdown in distilled water for fabricating the helical microchannels array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4236-4238.
- [8] AKHATOV I, LINDAU O, TOPOLNIKOV A, *et al.* Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble[J]. *Physics of Fluids*, 2001, 13(10): 2805-2818.
- [9] OHL C D, KURZ T, GEISLER R, *et al.* Bubble dynamics, shock waves and sonoluminescence[J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 1999, 357(1751): 269-294.
- [10] WEI T, HAN Y K, LI Y J, *et al.* Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. *Optics Express*, 2008, 16(8): 5764-5769.
- [11] WU Y M, LI M, CHENG G H. Fabricating micro fiber Fabry-Perot sensor with femtosecond laser pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(4): 584-587 (in Chinese).