

文章编号: 1001-3806(2017)06-0916-05

飞秒激光制备光纤 U 形微结构应用于折射率传感

宁贵毅¹, 傅贵¹, 史萌^{1*}, 付永栋¹, 马任德², 苏富芳¹

(1. 曲阜师范大学 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165; 2. 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

摘要: 为了实现低成本、高精度的折射率测量, 采用飞秒激光微加工技术, 制备出基于 U 形微结构的多模光纤液体折射率传感器。研究了传感器的通光功率变化值与 U 形槽深度以及 U 形槽内液体折射率的关系, 同时探究了在相同光损耗情况下不同烧蚀长度对灵敏度的影响, 并使用射线理论和模式理论对传感机理进行了分析。结果表明, 该传感器在折射率 1.3331 ~ 1.3731 范围内具有良好的线性响应, 且可以做到 5700 μ W/RIU 的灵敏度; 同时在 10dB 损耗情况下 20 μ m 烧蚀长度具有较好的灵敏度。该传感器具有结构简单、容易制备、灵敏度高和低成本等优点, 在化学、生物、医学、环境监测等方面有广泛的应用前景。

关键词: 传感器技术; 飞秒激光; 光纤传感器; U 形微结构; 折射率

中图分类号: TN253; TP212.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.029

Fabrication of optical fiber U-shaped microstructure by femtosecond laser and its application in refractive index sensing

NING Guiyi¹, FU Gui¹, SHI Meng¹, FU Yongdong¹, MA Rend², SU Fufang¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: In order to realize refractive index (RI) measurement with low cost and high precision, a multimode fiber liquid refractive index sensor based on U-shaped microstructure was fabricated by femtosecond laser micromachining. The relationship of the variation of the optical power of the sensor, the depth of the U-shaped groove and the refractive index of the liquid in the U-shaped groove were studied. The influence of the different ablation lengths on the sensitivity was also discussed. The sensing mechanism was analyzed based on the influence of the radiation theory and the model. The results show that the sensor has a good linear response in the range of 1.3331 ~ 1.3731 (refractive index), and can reach 5700 μ W/RIU (refractive index unit) sensitivity. While in the case of 10dB loss, a good sensitivity can be obtained at 20 μ m ablation length. The sensor has advantages of simple structure, easy preparation, high sensitivity and low cost. It has wide application prospect in chemistry, biology, medicine and environmental monitoring.

Key words: sensor technique; femtosecond laser; fiber optic sensor; U-shaped microstructure; refractive index

引 言

基于光纤的折射率传感器由于体积小、重量轻、不受电磁干扰、受温度影响小、能进行远程实时监测等优点, 在化学、生物、医学、环境监测等方面有广泛的应用。传统的光纤折射率传感器通常利用单模光纤 (single mode fiber, SMF)、锥形光纤、光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF), 例如光纤布喇格光栅 (fi-

ber Bragg grating, FBG)、长周期光纤光栅 (long-period fiber grating, LPG) 和光纤干涉仪等^[1-6]。然而, 这些折射率传感器具有成本较高或制作困难等缺点^[6]。

飞秒激光由于其超短的脉冲时间和精确的空间分布, 且飞秒激光加工具有快速、高效、热影响小等优点, 可以实现对材料进行微米量级的加工, 且加工结构、加工精度不受环境和材料性质的影响, 可在材料内部或表面精确加工制作孔、沟槽等结构^[7-10]。现在已广泛应用于各种材料的加工, 包括陶瓷、金属、聚合物和透明材料, 例如石英玻璃等^[11-13]。近年来, 利用飞秒激光微加工在光纤上制作微通道和法布里-珀罗干涉仪, 为制作低成本和对温度不敏感的折射率传感器提供了一种解决方案^[14-19]。

在本文中, 作者提出了一种利用飞秒微加工技术

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11104162); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (2011BSB01110)

作者简介: 宁贵毅 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: philipyes@163.com

收稿日期: 2016-12-22; 收到修改稿日期: 2017-02-24

在多模光纤表面制作 U 形微结构的紧凑型光纤折射率传感器。该折射率传感器具有容易制造、成本低廉、在折射率 1.3331 ~ 1.3731 范围内具有良好的线性响应的特点。该传感器是通过观测通光功率的变化情况检测折射率的变化,这相比较与其它检测方式具有低成本、高灵敏度的优点。

1 实验

实验中使用的是相干公司生产的掺钛蓝宝石飞秒激光系统,输出的激光中心波长为 800nm,脉宽为 35fs,重复频率为 1kHz。实验中使用的光纤是长飞公司生产的普通多模光纤(G651),纤芯直径为 62.5μm(实验装置如图 1 所示)。将光纤去除涂覆层并用酒精清洗干净后,将光纤固定在 3 维电动平台上,后将光纤两端分别连接宽带光源(broad band source, BBS)(波长范围 1565nm ~ 1603nm)和光谱仪(optical spectrum analyzer, OSA)。激光脉冲能量通过可调式衰减片控制,光纤的移动通过 3 维电动平台控制。

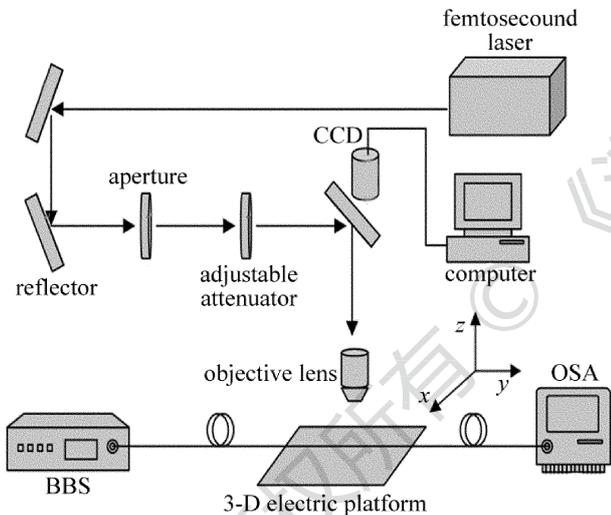


Fig. 1 Schematic diagram of femtosecond laser micromachining equipment

飞秒激光经过 10 倍显微镜(数值孔径为 0.45)聚焦在光纤表面,利用计算机控制 3 维电动平台,使焦点在 3 维空间中移动。首先调整位移平台高度使焦点打在光纤表面,打开宽带光源和光谱仪,然后调整位移平台使激光焦点在 x-y 平面(2 维)内移动,当焦点在 x-y 平面(2 维)内扫描刻蚀完一层后,电动位移平台相应地在 z 方向上升高 2μm,同时观察光谱仪中光谱变化情况,当光损耗达到要求后遮挡激光。图 2a 为加工出的微槽的示意图。

微槽的深度、内壁的平整程度与激光脉冲能量高低、位移平台扫描速率快慢密切相关。分别探究了不同激光脉冲功率,不同位移平台扫描速率和不同聚焦前激光光斑大小对微槽加工质量的影响,以获得最优

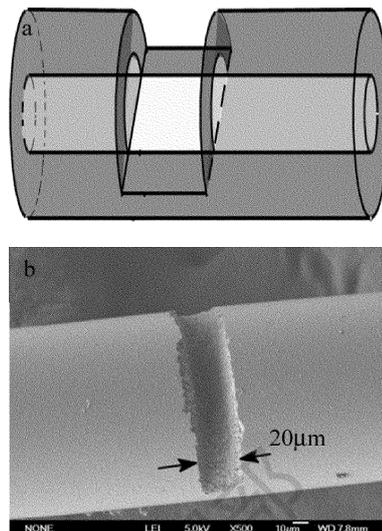


Fig. 2 a—area structure diagram of fiber optic sensor b—U-shaped micro groove structure under the scanning electron microscope

加工条件。实验结果表明,当激光脉冲功率平均为 12mW、电动位移平台扫描速率为 30μm/s、进入显微镜前激光光斑直径为 5mm 时,制备的微槽质量较好。图 2b 为对传感区域用扫描电镜观测后的图像。通过图像能够清楚地看到,飞秒激光微加工的区域主要集中在想加工的区域,对其它区域影响很小,在微槽底部平整度较好,没有凸起或凹陷结构和碎末等杂物,槽壁具有良好的垂直性和平行度。在加工过程中,由于飞秒激光脉冲具有极高的能量密度和极短的作用时间,致使材料中的电子通过多光子吸收获得能量产生高密度等离子体,此后由激光-等离子体作用使材料去除。由于飞秒激光脉冲时间极短,远小于材料中热量的积累和传播时间,因此在烧蚀的过程中,不需要考虑烧蚀区域周围材料因热膨胀引起的折射率变化。

实验中利用上述加工参量,制作了沿光纤径向烧蚀长度为 20μm、损耗分别为 5.47dB, 9.91dB, 14.18dB 的样品,烧蚀长度为 10μm、损耗为 10.03dB 的样品,以及烧蚀长度为 30μm、损耗为 9.85dB 的样品(光纤光损耗值(dB) = -10lg[输出功率(mW)/输入功率(mW)]),分别记为 L₁, L₂, L₃, L₄, L₅。然后两端分别连接宽带光源和光功率计,将传感区域放入不同折射率的待测溶液中并记录光功率计数值。每次测量后都用蒸馏水将传感区域清洗干净,并用烘干箱烘干,直到光功率计读数回复到初始值为止。

2 结果与讨论

图 3a ~ 图 3c 所示是 3 种不同光损耗的样品 L₁, L₂ 和 L₃ 在波长 1310nm, 1400nm, 1500nm, 1550nm 处的通光功率变化值随溶液折射率的变化曲线。由图可知,当槽内溶液折射率相同时,随通光波长的变化通光

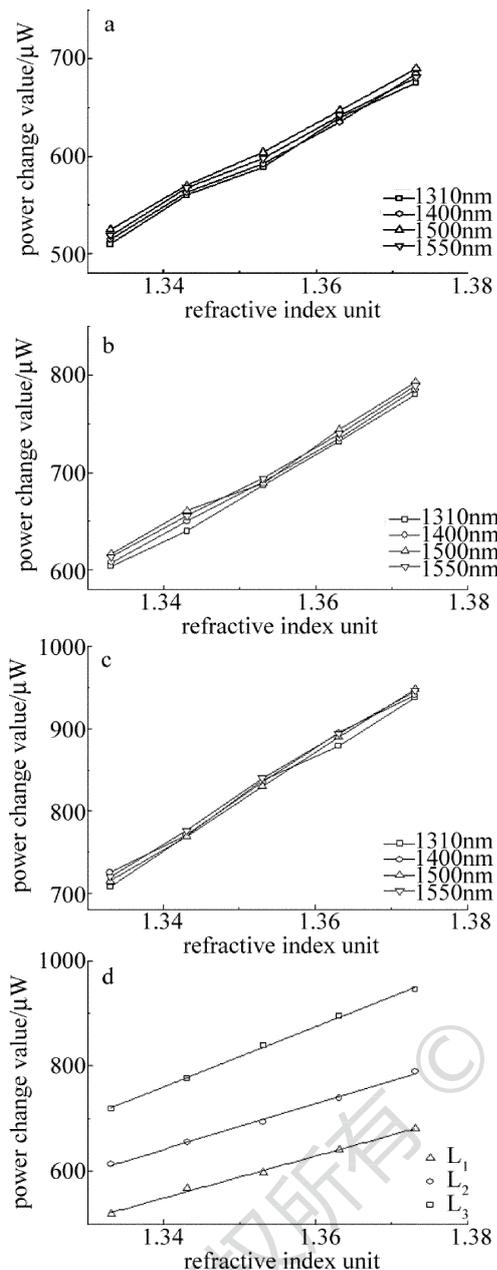


Fig. 3 a—relationship of power change and refractive index with different wavelengths at L_1 b—relationship of power change and refractive index with different wavelengths at L_2 c—relationship of power change and refractive index with different wavelengths at L_3 d—relationship of power change and refractive index at L_1, L_2, L_3

功率的变化值有一些起伏,这是由于溶液对不同波长的光能量吸收和散射的不同引起的。此外,在折射率 1.3331 ~ 1.3731 范围内各个波长处样品的通光功率值的变化随液体折射率的变化情况大体一致,说明波长对通光功率的变化值与折射率关系影响不大,因此在这里选择通信波长 1550nm 处对样品通光功率变化值随溶液折射率变化情况进行分析。图 3d 所示在 1550nm 处, L_1, L_2, L_3 3 种具有不同通光损耗的折射率 U 形槽,当加入不同折射率的待测液体后,通光功率的变化情况。由图可知,随着在 U 形槽中加入的待测液

体的折射率的增大,通光功率的变化值增大,通过拟合可以看到,加入的待测液体折射率在 1.3331 ~ 1.3731 区间内,通光功率的变化值的变化情况具有良好的线性,而且随着 U 形槽光损耗的增加,拟合后得到直线的斜率也在增加,说明对于长 20μm 的 U 形槽,随着光损耗的增加,折射率传感区域对折射率变化的感应灵敏程度增加。由图 3 可知, L_1 的折射率灵敏度为 3980μW/RIU, L_2, L_3 的折射率灵敏度分别为 4340μW/RIU 和 5700μW/RIU。

对于传感器的光损耗与 U 形槽深度和待测液体折射率的关系,可以用射线光学理论进行分析。如图 4 所示,纤芯中传播的光在到达 U 形槽交界处时,一部分光会在交界处发生全反射后进入包层后损耗或进入空气中损耗,还有一部分光在交界面处不满足全反射条件折射进入 U 形槽空间中同样大部分在空气中损耗。由图可知,当 U 形槽深度增加时,第 1 种光损耗和第 2 种光损耗都会增加,即使一小部分折射光线可以传播到 U 形槽侧壁的纤芯处,由于光纤折射率与空气折射率差较大,较大部分的光也不能耦合到纤芯中。根据公式:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

式中, n_1 为纤芯折射率, n_2 为微槽中的折射率; θ_1 和 θ_2 为光线与法线夹角,如图 4 所示。当 U 形槽中加入待测液体后,第 1 种光损耗受 U 形槽内溶液折射率的变化影响了全反射条件,使一部分光重新耦合到光纤内,但同时有一部分光满足全反射条件造成光损耗,所以这一部分光损耗变化量较小。第 2 种光损耗由于待测液体折射率高于空气,在 U 形槽壁处折射进入槽内在空气中损耗的光会再次耦合进入出纤芯,这会导致光纤损耗减小使通光功率提升,并且随着带测液体折射率的提升耦合进入纤芯的光增加。

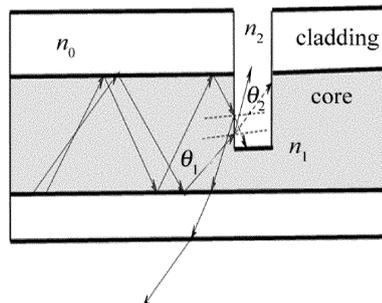


Fig. 4 Propagation model of U-shaped slot light

如图 5 所示, L_2, L_4, L_5 光损耗相近,但烧蚀长度有较大变化的 U 形槽在接入相同功率的光源后,加入不同折射率的待测液体后,通光功率的变化值。由图可知, L_2, L_4, L_5 的折射率灵敏度分别为 4340μW/RIU, 1310μW/RIU 和 3410μW/RIU。可以明显看到,当烧

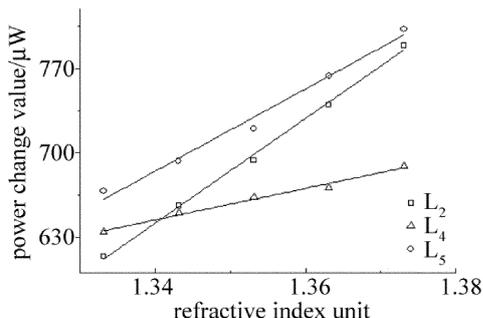


Fig. 5 Relationship of power change and refractive index with the different refractive indexes of L_2, L_4, L_5

蚀的 U 形槽的长度为 $20\mu\text{m}$ 时, 相较烧蚀长度为 $10\mu\text{m}$ 和 $30\mu\text{m}$ 有较好的折射率探测灵敏度。这是由于当烧蚀长度为 $30\mu\text{m}$ 时, 虽然达到了相应的损耗值, 但是由于烧蚀深度与烧蚀长度为 $20\mu\text{m}$ 相比较浅, 所以第 2 种光损耗相对较少导致折射率灵敏度较低。当烧蚀长度为 $10\mu\text{m}$ 时, 虽然烧蚀深度较 $20\mu\text{m}$ 时深, 但是由于烧蚀长度较短, 加入较低折射率的待测液体后, 第 2 种光损耗情况损耗的光已经大部分耦合进入纤芯, 再次提高加入的待测液体的折射率可影响的损耗的光相对较少。可见光损耗为 10dB 左右时烧蚀长度为 $20\mu\text{m}$ 的 U 形槽对折射率的测量具有较好的灵敏度, 同时加工难度相对较低。

对于传感器的光损耗与 U 形槽深度和待测液体折射率的关系, 同样可以用模式理论进行分析。当光进入多模光纤后, 会在光纤中激发出几百甚至上千个模式, 这些模式在光纤中传播到烧蚀区域, 由于在烧蚀区域光纤的折射率发生较大变化, 会使一部分模式的光不能在光纤中传播造成损耗。当在烧蚀区域加入待测液体后, 可认为对烧蚀区域的折射率情况向原光纤折射率情况进行了匹配, 由于光纤折射率高于待测液体折射率, 因而随着待测液体折射率的提高, 会有更多模式的光通过烧蚀区域, 从而增加了通光功率。如图 3d 所示, 在 1550nm 处, L_1, L_2, L_3 3 种具有不同通光损耗的折射率 U 形槽, 由于其烧蚀深度不同, 当烧蚀深度较高时, 受影响的光传播模式较多, 对烧蚀区域加入的待测液体的折射率的变化较为敏感。

如图 5 所示, L_2, L_4, L_5 光损耗相近, 但是其烧蚀长度不同。对于 L_4 , 虽然烧蚀深度较深, 影响的光传播模式较多, 但其烧蚀长度较短, 加入待测液体后, 光在待测液体中传播的距离较短, 因而对折射率的变化变化不够敏感。对于 L_5 , 虽然烧蚀长度较长, 但其烧蚀深度较浅导致影响的光传播模式较少, 同样对折射率的变化不够敏感。可见对于光损耗为 10dB 左右时烧蚀长度为 $20\mu\text{m}$ 的 U 形槽对折射率的测量具有较好的灵敏度。

3 结论

应用飞秒激光微加工技术, 制作了一种新型多模光纤 U 形微槽折射率传感器, 较易制备且传感器结构简单。实验结果表明, 该传感器通光功率的变化值与 U 形槽内折射率的变化呈近似线性变化, 在 U 形槽烧蚀长度相同时, 随着光纤通光损耗的增加, 传感器灵敏度增加。在折射率 $1.3331 \sim 1.3731$ 区间内得到的最高灵敏度为 $5700\mu\text{W}/\text{RIU}$ 。作为一种全光纤器件, U 形槽折射率传感器在化学、生物、医学、环境监测等方面有广泛的应用。

参考文献

- [1] GUAN C Y, TIAN X Z, LI S Q, *et al.* Long period fiber grating and high sensitivity refractive index sensor based on hollow eccentric optical fiber[J]. *Sensors and Actuators*, 2013, B188: 768-771.
- [2] IADICICCO A, CUSANO A, CUTOLO A, *et al.* Thinned Fiber Bragg Gratings as high sensitivity refractive index sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 1149-1151.
- [3] ZHOU J T, WANG Y P, LIAO C R, *et al.* Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber Michelson interferometer[J]. *Sensors and Actuators*, 2015, B208: 315-319.
- [4] TIAN Z, YAM S S H, LOOCK H P. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1105-1107.
- [5] QIAN W W, CHAN C C, ZHAO C L, *et al.* Photonic crystal fiber refractive index sensor based on a fiber Bragg grating. demodulation[J]. *Sensors and Actuators*, 2012, B166/167: 761-765.
- [6] JHA R, VILLATORO J, BADENES G, *et al.* Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 617-619.
- [7] SCHAFFER C B, BRODEUR A, GARCÍA J F, *et al.* Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(2): 93-95.
- [8] XING S L, LIU L, ZOU G Sh, *et al.* Effects of femto second laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0403001 (in Chinese).
- [9] NOLTE S, MOMMA C, JACOBS H, *et al.* Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, B14(10): 2716-2722.
- [10] BO L, ZHAO X L, LIU Y, *et al.* Optical fiber micro-hole sensor fabricated with femto second laser[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 101-104 (in Chinese).
- [11] CHEN C H, TSAO T C, LI W Y, *et al.* Novel U-shape gold nanoparticles-modified optical fiber for localized plasmon resonance chemical sensing [J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(7): 1207-1214.
- [12] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 219-225.
- [13] OSELLAME R, MASELLI V, VAZQUEZ R M, *et al.* Integration of optical waveguides and microfluidic channels both fabricated by femtosecond laser irradiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(23): 231118.
- [14] RAO Y J, DENG M, ZHU T. Visibility-enhanced in-line Fabry-Perot interferometers by the use of femtosecond lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1459-1462 (in Chinese).

- [15] 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.
- [16] WEI T, HAN Y, LI Y, *et al.* Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2008, 31(17): 2559-2561.
- [17] SUN X Y, DONG X R, HU Y W, *et al.* A robust high refractive index sensitivity fiber Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser machining and chemical etching[J]. *Sensors and Actuators*, 2015, A230: 111-116.
- [18] LIAO C R, HU T Y, WANG D N. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22813-22818.
- [19] QUE R Y, LIU Y, SUN H H, *et al.* Refractive index sensor based on F-P interferometer cavity in optical fiber with double-openings [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 780-784 (in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©