

doi: 10. 3788/gzxb20124107. 0841

基于光纤 M-Z 干涉的高灵敏度液体折射率传感器的实验研究

周 赢 武

(闽江学院 物理学与电子信息工程系, 福州 350108)

摘 要:提出并制备了一种基于 Mach-Zehnder 干涉效应的高灵敏度光纤液体折射率传感器. 分别利用 NaCl 溶液和甘油溶液, 研究了传感器的透射光谱和外界介质折射率的关系. 实验结果表明, 随着周围介质折射率的增大, 传感器干涉谱的极小值点对应的波长向长波方向漂移, 在 1. 333~1. 356 的折射率变化范围内, 极小值点对应的波长的漂移量和折射率的变化具有较好的线性关系, 对应的灵敏度约为 4 086 nm/refractive-index. 该传感器制作简单、结构紧凑, 在生物和化学测量中具有较好的应用前景.

关键词:M-Z 干涉; 折射率; 传感器; 锥形光纤
中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

文章编号:1004-4213(2012)07-0841-4

制作相对复杂.

0 引言

由于光纤传感器具有成本低、体积小、分辨率高、复用能力和在恶劣环境下的使用、抗电磁干扰以及可远程操作控制等优点, 因此在光纤传感器应用领域较广, 受到研究者的广泛关注^[1-4]. 在生物和化学应用领域, 可以通过折射率检测来鉴定物质, 因此折射率传感器, 特别是基于光纤的折射率传感器已成为近年来研究的一个热点^[5-9].

迄今为止, 报道了多种基于光纤的液体折射率传感器. 如基于光纤布喇格光栅的液体折射率传感^[5]、基于长周期光纤光栅的折射率传感器^[6-7]、单模光纤拉锥型折射率传感器^[8]、法布里-珀罗干涉型折射率传感器^[9-11]、基于单模-多模-单模(SMS)光纤结构的传感器^[12]以及多模-单模-多模(MM-SM-MM)光纤结构的传感器^[13]等. 但是这些传感器在测量折射率在 1. 33~1. 4 范围内的液体时, 灵敏度都不够理想, 而这一范围的折射率检测对蛋白质特性的分析非常重要^[8]. 文献^[14]报道了由微光纤构成的耦合器结构形式的液体折射率传感器, 他们首先利用拉锥技术, 将两根单模光纤拉锥到直径为 2. 8 μm , 然后将这两根光纤扭缠在一起构成传感器, 所得传感器的折射率灵敏度达到 2 735 nm/RIU(折射率每变化一个单位, 干涉谱的极小值点对应的波长漂移量为 2 735 nm), 这种传感器虽然灵敏度比较高, 但

制作相对复杂. 本文结合单模光纤拉锥技术和错位熔接技术^[15], 研制了一种新型光纤折射率传感器, 并利用 NaCl 溶液和甘油溶液做了折射率响应实验. 结果表明, 该传感器在测量折射率低于 1. 4 的液体折射率时, 灵敏度可以达到 4 086 nm/RIU. 该传感器制作简单、结构紧凑、灵敏度高, 在生物和化学测量中具有较好的应用前景.

1 传感器的工作原理及其制作

图 1 给出了该传感器的结构示意图. 由图 1 可知, 该传感器是种特殊结构的 M-Z 干涉仪, 第一段光纤和第二段光纤连接处有个错位, 在离错位点 L_0 处拉锥. 由第一段单模光纤(SMF_1)输入的光在错位处分成两部分的光, 其中一部分光进入第二段光纤的包层而激发出包层模, 另一部分进入第二段光纤的纤芯, 当光纤拉得很细时, 这部分光在锥形光纤也将变成包层模. 在锥形光纤的末端, 上述包层模将耦合进纤芯, 但由于它们传播的途径不同, 因此存在相

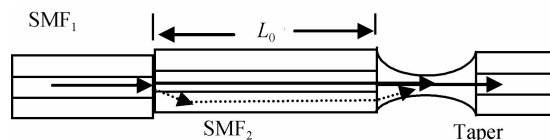


图 1 传感器的结构
Fig. 1 The schematic diagram of the sensor

基金项目:福建省教育厅服务海西重点项目(No. SHZ09005)资助

第一作者:周赢武(1968-),男,博士,副教授,主要研究方向为光通讯技术与器件及光纤传感技术. Email : ywzhou1073@sina. com

收稿日期:2012-01-17;修回日期:2012-03-31

位差,从而产生干涉现象.设 β_{cl}^m 、 β_{cl}^n 分别为第 m 、第 n 阶包层模的传输常量,这两个模式的光在光纤中传输 L 距离后的相位差为

$$\Delta\phi = (\beta_{cl}^m - \beta_{cl}^n)L = \frac{2\pi(n_{cl}^m - n_{cl}^n)L}{\lambda} \quad (1)$$

式中, n_{cl}^m 、 n_{cl}^n 分别为纤芯模和第 m 阶包层模的有效折射率.当相位差 $\Delta\phi$ 满足式(2)时,将出现干涉极小值.

$$\Delta\phi = \pi(2N+1) \quad (2)$$

式中 N 为整数.

由式(1)、(2)可知,对应干涉极小值的波长为

$$\lambda_n = \frac{2(n_{cl}^m - n_{cl}^n)L}{2N+1} = \frac{2\Delta n_{eff}L}{2N+1} \quad (3)$$

式中 $\Delta n_{eff} = n_{cl}^m - n_{cl}^n$.

由于光纤的涂覆层已被剥除,因此对于包层模,它相当于是以整个光纤(直径 $d=125\mu\text{m}$)为纤芯,而光纤周围的介质为包层,相当于是段裸光纤.当周围介质的折射率发生变化时,将引起其归一化频率发生变化,从而导致包层模的有效折射率发生变化^[16].

由上述可知,如果把传感器浸入液体,当其周围液体的折射率变化时,包层模的有效折射率发生变化.由文献[12]可知,随着外界液体折射率的变大,式(3)中的 Δn_{eff} 将变大,导致干涉极小值的波长 λ_n 向长波方向漂移变化,因此通过测量 λ_n 的漂移量,就可以知道周围液体介质的折射率,从而达到测量液体折射率的目的.

在制作传感器时,首先利用光纤熔接机的手动熔接功能,将两段光纤进行错位熔接,然后将熔接好的光纤放入如图2所示的拉锥平台拉锥.该拉锥系统所用的火焰为氢-氧焰,火焰头可在计算机的控制下前后左右移动,该系统有两个用于固定光纤的平台,它们可在计算机的控制下左右移动.

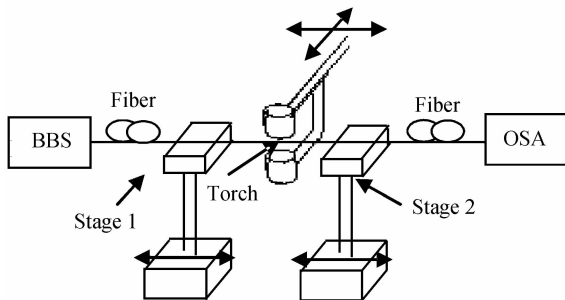


图2 光纤拉锥系统

Fig. 2 The schematic diagram of fiber taper system

实验中所用的光纤为康宁单模光纤.熔接时,两段光纤纤芯的偏移量约为 $3\mu\text{m}$.图3给出了拉锥后的一个实际样品结构图,该样品拉锥点离错位点的距离约为 2cm .利用显微镜测量得知该样品锥区的

直径大小约为 $5.8\mu\text{m}$,而锥区的长度约为 2.6mm .

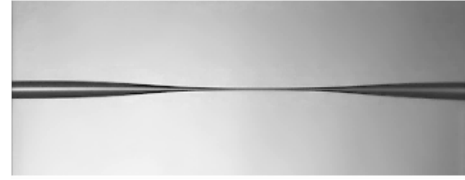


图3 拉锥光纤结构

Fig. 3 The structure of the tapered fiber

2 折射率传感实验及其分析

传感器制备好后,将其两端用胶水固定在一块玻璃片上.该传感器在空气中的光谱响应如图4所示.由图可知,该光谱不是很规则的正弦形式,表明具有多种模式发生了干涉.

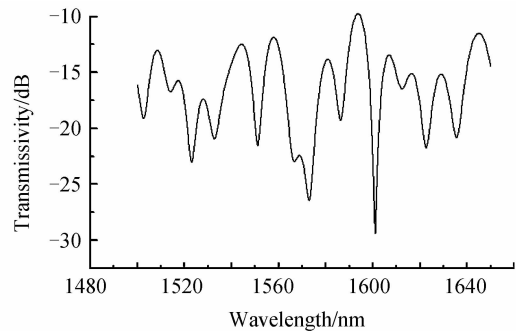


图4 传感器的光谱

Fig. 4 The spectrum of the sensor

本文利用 NaCl 晶体配置了不同折射率的溶液,然后将传感器放入装有不同折射率的 NaCl 溶液的容器中,测量了相应的光谱响应,如图5.图中实线对应的是传感器在水中的光谱响应.与图4中的谱线对比可知,传感器在水中的光谱比在空气中的光谱更规则,这主要是由于当传感器放入水中后,周围介质(水)的折射率比空气的折射率大,有些在空气中存在的模式,在高折射率的介质中变成泄露模而消失了.

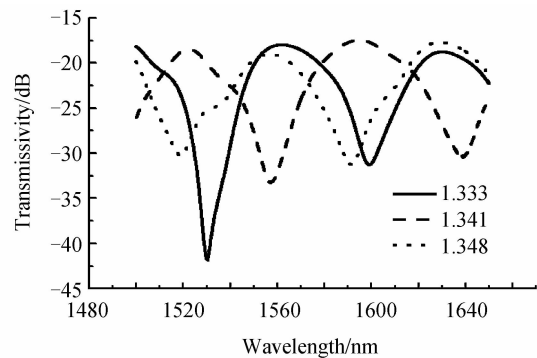


图5 传感器在不同折射率溶液中的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the sensor in solutions with different refractive index

图5中的长划线对应的液体为折射率为 1.341 的 NaCl 溶液,而点虚线对应的 NaCl 溶液的折射率

为 1.348. 由图 5 可知,随着周围液体折射率的增大,干涉极小值点的波长向长波方向漂移,这与前面理论分析的结果一致.

以图 5 中的实线所示的波长为 1 530.16 nm 的干涉波谷为对象,研究了波谷波长漂移和传感器周围液体折射率变化的关系,结果如图 6. 图中的黑色点为实验数据,而实线为线性拟合直线. 由图 6 可知,在 1.333 ~ 1.356 的折射率变化范围内,1 530.16 nm 处中心波长漂移量和折射率的变化具有较好的线性关系(拟合的相关系数 0.998 7),总共漂移了 93.2 nm,其灵敏度为 4 086 nm/RIU.

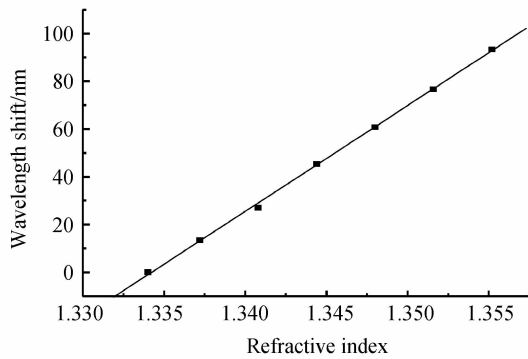


图 6 干涉极小值的波长漂移量和 NaCl 溶液折射率的变化关系

Fig. 6 The relation between the resonance wavelength shift to the refractive index of the NaCl solution

为了进一步验证该传感器的折射率响应特性,利用甘油配置了不同折射率的甘油溶液. 测量了传感器在不同折射率甘油溶液中的响应谱,如图 7. 图中实线和图 5 中的实线一样,是传感器在水中的光谱,而长划线对应的甘油溶液的折射率为 1.336,而点虚线对应的甘油溶液的折射率为 1.343. 由图 7 可知,传感器在甘油中的响应和在 NaCl 中的响应类似,随着甘油折射率的增大,干涉波谷对应的波长向长波方向偏移.

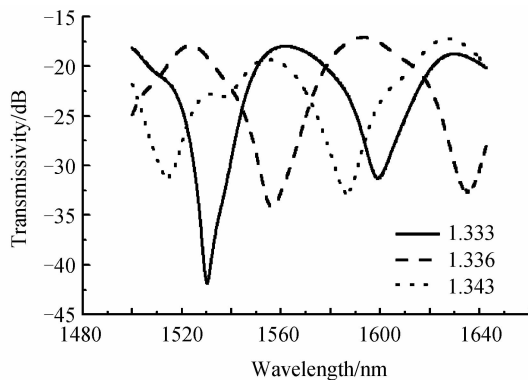


图 7 传感器在不同甘油溶液中的透射光谱

Fig. 7 Transmission spectrum of the sensor in glycerin solutions with different refractive index

以图 7 中实线所示的波长为 1 530.16 nm 的干涉波谷为对象,研究了干涉谷波长的漂移随甘油溶

液折射率变化的关系,所得的结果如图 8. 由图 8 可知,在 1.333 ~ 1.356 的折射率变化范围内,1 530.16 nm 处的中心波长的漂移量和甘油折射率的变化也具有较好的线性关系(拟合的相关系数 0.998 5),总共漂移了 81.39 nm,其灵敏度为 4 078 nm/RIU,这和该传感器在 NaCl 溶液中的灵敏度基本一致.

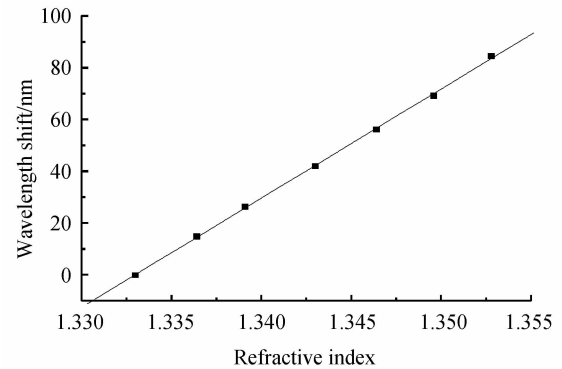


图 8 干涉极小值的波长漂移量和甘油溶液折射率的变化关系

Fig. 8 The relation between the resonance wavelength shift to the refractive index of the glycerin solution

3 结论

结合单模光纤错位熔接和光纤拉锥技术,提出并制作了一种新型光纤折射率传感器,并利用 NaCl 溶液和甘油溶液,研究了传感器的透射谱和外界介质折射率的关系. 实验结果表明,随着外界液体折射率(NaCl 溶液或甘油溶液)的增加,传感器干涉波长的漂移量线性增大. 在 1.333 ~ 1.356 折射率范围内,传感器的折射率灵敏度高达 4 086 nm/RIU. 本文所研制的传感器具有制作简单、结构紧凑、成本低廉以及灵敏度高等优点,在生物化学领域具有潜在的应用前景.

参考文献

- [1] MARKUS S, BERND W, NORBERT F. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor with < 50 pm displacement resolution using three-wavelength digital phase demodulation[J]. *Optics Express*, 2001, **8**(8): 4752-480.
- [2] ZU Peng, XIANG Wang-hua, JIN Yong-xing. Fabrication of temperature-insensitive twist sensor using low birefringent photonic crystal fiber based sagnac interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1433-1436.
祖鹏, 向望华, 金永兴. 基于低双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的超低温度系数扭曲传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1433-1436.
- [3] SANG X Z, YUC Hong-xiu, MAYTE E N T, et al. Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, **120**(2): 754-757.
- [4] WANG Jia, HOU Hong-lu, XU Jin-tao. Sagnac fiber - optic current sensor without vibration sensitivity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 57-61.
王嘉, 侯宏录, 徐金涛. 一种新型 Sagnac 式光纤电流传感器

- [J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 57-61.
- [5] LIANG Wei, HUANG Yan-yi, XU Yong, *et al.* Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(15): 1511-22.
- [6] CHONG J H, SHUM P, HARYONO H, *et al.* Measurement of refractive index sensitivity using long period grating refractometer [J]. *Optics Communications*, 2004, **229**: 65-69.
- [7] JING Qing-li, Huang Xiao-hong, Yan li-Fen, *et al.* Optimization of long-period fiber grating for refractive-index sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1201-1204.
金清理, 黄晓虹, 颜利芬, 等. 长周期光纤光栅折射率传感器的结构优化 [J]. 光子学报, 2011, **40**(8): 1201-1204.
- [8] TIAN Z B, YAM S S H, BARNES J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(8): 626-628.
- [9] JING Qing-li, YAN li-Fen, WANG Zhen-guo. Real-time high sensitivity variation of solution concentration monitor based on Fabry-Pérot interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 431-435.
金清理, 黄晓虹, 王振国, 等. 利用光纤 F-P 谐振器干涉透射波长同时测量混合溶液中多溶质浓度 [J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2147-2151.
- [10] SUN Dong, RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang. Laser-machined miniature fiber-optic refractive-index sensor tip [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1239-1242.
孙东, 冉曾令, 饶云江. 激光加工微型光纤折射率传感器的工艺与特性 [J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1239-1242.
- [11] NGUYEN L V, VASILIEV M, ALAMEH K. Three-wave fiber Fabry - Pérot interferometer for simultaneous measurement of temperature and water salinity of seawater [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(7): 450-452.
- [12] ZHAO Yu, JIN Yong-xing, DONG Xin-yong, *et al.* Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6): 1516-1519.
赵宇, 金永兴, 董新永, 等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究 [J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1516-1519.
- [13] VILLATORO J, MONZÓN-HERNÁNDEZ D. Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **24**(3): 1409-1413.
- [14] LIAO C R, WANG D N, HE Xiaoying, *et al.* Twisted optical microfibers for refractive index sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(13): 848-850.
- [15] SHAO Li-yang, ALBERT J. Lateral force sensor based on a core-offset tilted fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(7): 1855-1858.
- [16] MENG Zhao-fang, YAN Bin-bin, SANG Xin-zhu, *et al.* Influence of temperature on performance of fiber Bragg grating based on chemical sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 775-779.
孟照方, 颜玢玢, 桑新柱, 等. 温度对光纤布喇格光栅化学传感器性能的影响 [J]. 光子学报, 2009, **38**(4): 775-779.

Experimentally Study on High-sensitivity Fiber-optic Refractometers Based on Mach-Zehnder Interference

ZHOU Ying-wu

(Department of Physics and Electronics Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou, 350108, China)

Abstract: A high sensitivity fiber-optic refractive index sensor based on Mach-Zehnder interferometer is proposed and fabricated. The relationship between the resonance wavelength shifts to the refractive index is studied with NaCl and glycerin solution. The experimental results show that the resonance wavelength shifts to longer wavelength with the increase of the refractive index of the surrounding media, and the wavelength shift is nearly linear to the refractive index with a sensitivity is of 4 086 nm/refractive-index as the refractive index ranges from 1.333 to 1.356. The sensor is easy to fabricate, compact, and will be useful in chemical and biotechnological industry.

Key words: Mach-Zehnder interference; Refractive index; Sensor; Tapered fiber