

基于腰椎放大单模-多模-单模光纤结构的折射率传感器

安佳丽 金永兴 孙明明 董新永

(中国计量学院光学与电子科技学院 浙江 杭州 310018)

摘要 报道了一种基于腰椎放大和单模-多模-单模(SMS)光纤结构相结合的折射率传感器。在两根单模光纤(SMF)之间,放大熔接一根长为 18 mm 的多模光纤(MMF),构成全光纤传感器。外界折射率的变化会引起光纤包层模的有效折射率的改变,从而导致干涉光谱的变化。实验结果表明,当外界折射率变化范围为 1.3725~1.4620 时,传感器的灵敏度为 152.237 nm/RIU(RIU 为折射率单位)。该折射率传感器的温度交叉灵敏度为 2.6×10^{-4} RIU/°C,因此温度变化很小时,温度对折射率测量的影响可以忽略。该的折射率传感器制造简单且成本低,因此在生物化学测量中有比较好的应用前景。

关键词 传感器; 折射率; SMS 光纤结构; 腰椎放大

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s105013

Refractive Index Sensor Based on Waist-Enlarged Tapers and Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure

An Jiali Jin Yongxing Sun Mingming Dong Xinyong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract A fiber refractive index sensor based on the combination of waist-enlarged tapers and singlemode-multimode-singlemode (SMS) fiber structure is demonstrated. A 18 mm multi-mode fiber (MMF) is spliced with waist-enlarged taper between two conventional single-mode fibers (SMFs) to construct an all-fiber sensor. The effective refractive index of the cladding modes changes with the external refractive index. It shows that the sensitivity of the refractive index sensor is 152.237 nm/RIU (RIU is refractive index unit) in the refractive range index from 1.3725 to 1.4620. The temperature cross sensitivity of the refractive index sensor is 2.6×10^{-4} RIU/°C, so when the temperature changes little, the temperature impact on the refractive index measurement can be ignored. The presented refractive sensor is with simple manufacture and relatively low cost, so it has great potential for biological and chemical applications.

Key words sensors; refractive index; singlemode-multimode-singlemode fiber structure; waist-enlarged tapers

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788

1 引 言

液体折射率作为反映液体本质的重要物理参量,在生产实践中具有重要的地位,因此液体折射率检测方法的探究有着重要的研究意义与价值。关于折射率的测量方法有很多,由于光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、抗化学腐蚀、尺寸小和响应快速等特点^[1-3],在折射率传感领域的应用引起了人们的广泛兴趣。目前基于光纤的各种折射率传感器

已得到广泛的研究,如基于光纤布拉格光栅(FBG)^[4-6]、长周期光纤光栅(LPG)^[7-10]、倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)^[11]和光子晶体光纤(PCF)^[12-13]等的折射率传感器。

近年来,基于单模-多模-单模(SMS)结构的多模干涉广泛应用于应变传感器、温度传感器和位移传感器等领域,利用 SMS 结构的折射率传感器也有报道^[14],但在利用 SMS 结构的折射率传感器中,需要

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-11-06

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY13F050004)

作者简介: 安佳丽(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: ajlcdr@163.com

导师简介: 金永兴(1972—),男,教授,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: jinyongxing@cjlu.edu.cn(通信联系人)

对多模光纤进行腐蚀以去掉包层来进行测量,这使得制造过程变得复杂。本文给出了一种基于腰椎放大和 SMS 结构相结合的光纤折射率传感器。在两根单模光纤(SMF)之间,放大熔接一段多模光纤(MMF),由于腰椎放大造成纤芯的不匹配,很容易激发包层模的产生,并与基模发生干涉。采用放大熔接光纤使传感器结构更加稳固,不易造成物理伤害。

2 传感器的制作和原理

提出的新型传感器示意图如图 1 所示。传感器结构中,加入两个 SMF 之间的 MMF 长度为 18 mm,纤芯直径为 $62.5\ \mu\text{m}$ 。通过熔接机(Fujikura FSM-60S),将 MMF 的两端分别与两根 SMF 进行放大熔接。在熔接过程中,为了形成腰椎放大,将光纤重叠量设置为 $150\ \mu\text{m}$ 进行熔接,其他参数设置有:放电强度为标准、放电时间为 2000 ms。在电弧放电以后,由于大的重叠量和推力作用将推到一起的光纤直径逐渐扩大,形成腰椎放大点。

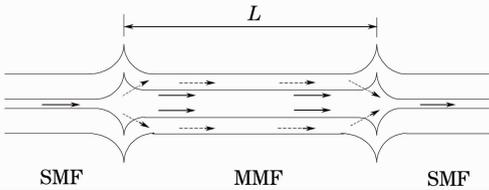


图 1 腰椎放大熔接 SMS 结构的示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the SMS fiber structure with two waist-enlarged tapers

光波从输入的 SMF 传送到第一个腰椎放大点时,由于腰椎放大部分光耦合到 MMF 的包层进行传输,又由于 SMF 和 MMF 的模场不匹配会激发一系列的高阶模在 MMF 的纤芯中传输;在第二个腰椎放大点时,包层模和高阶模都耦合到 SMF 的纤芯中传输,因此在整个传感头中有两种干涉方式:模式干涉和马赫-曾德尔模间干涉。图 2 为 SMS 结构和放大熔接 SMS 结构的干涉谱。由图可知,SMS 结构只有一个谐振波长,而腰椎放大熔接的 SMS 结构有多个谐振波长,同时放大熔接 SMS 结构的输出损耗较小。

利用 SMS 结构的多模干涉制作的光纤折射率传感器已有报道^[10],传感原理是利用谐振波长的自映像(由于不同模式的光之间产生耦合,导致能量出现叠加或削弱的情况,就会有能量极大值和极小值出现,且整个分布呈现很好的周期性)实现折射率的测量,在 SMS 结构中就需要将 MMF 的包层用氢氟

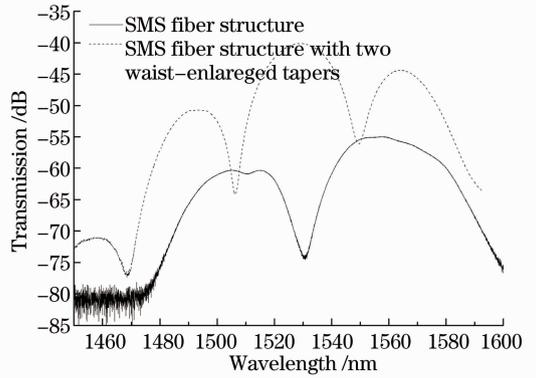


图 2 SMS 结构和放大熔接 SMS 结构的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of the SMS fiber structure and the SMS fiber structure with two waist-enlarged tapers

酸腐蚀掉;而应用放大熔接时,MMF 的包层不需要腐蚀,因为腰椎放大可以激发包层模,当外界折射率改变时,包层模的有效折射率会发生变化,从而实现折射率的测量。因此,本文提出的结构简单,并且装置更加稳固。

3 实验和讨论

实验所用的光源为中心波长为 1550 nm 宽带光源 SLED(HY-SLED-1550),光源入射到如图 1 所示的传感器中,输出的干涉光谱用分辨率为 10 pm 的光纤光谱仪(OSA, Yokogawa AQ6370)进行检测。实验过程中保持环境温度不变,同时传感光纤被固定在载玻片上。每次测量后,用无水乙醇清洗传感单元,然后在空气中自然风干直到干涉光谱与传感器置于空气中的干涉光谱一致。测量用的溶液是甘油,折射率从 1.3725 变化到 1.4620。

将传感器置于不同折射率溶液的透射光谱如图 3 所示。由图 3 可知,随折射率的增加,谐振波长向短波方向移动。当传感器周围溶液的折射率从 1.3725 变化到 1.4620 时,谐振波长向短波方向移动

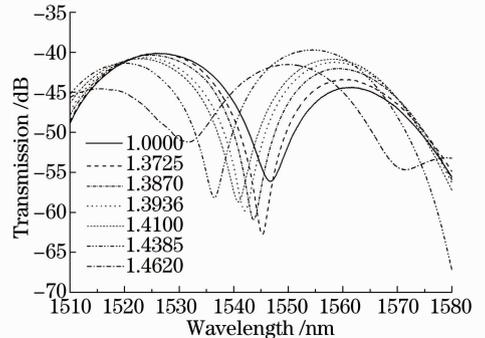


图 3 传感器置于不同折射率溶液中的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of the proposed refractive index sensor under different refractive indexes

了大约 13 nm。图 4 为谐振波长与液体折射率变化

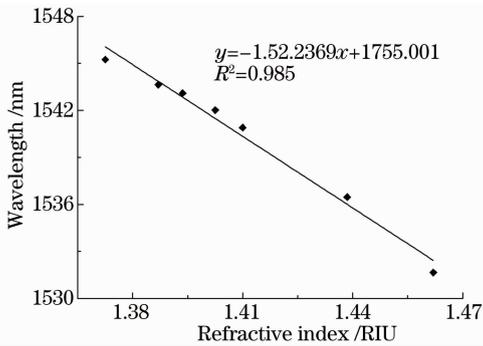


图 4 不同折射率与谐振波长的关系图

Fig. 4 Relationship between different refractive indexes and resonant wavelengths

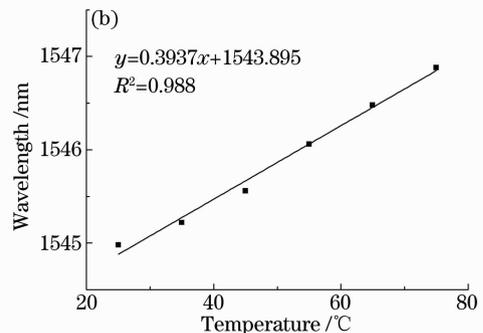
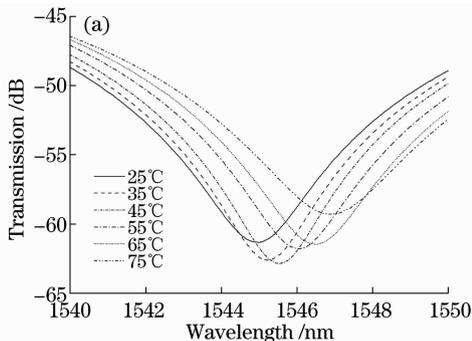


图 5 (a) 传感器在不同温度下的透射谱; (b) 不同温度与谐振波长的关系图

Fig. 5 (a) Transmission spectra of the sensor under different temperatures; (b) relationship between different temperatures and resonant wavelengths

4 结 论

在两根 SMF 之间放大熔接一段长为 18 mm 的 MMF, 构成一种新型的传感器。利用传感器测量外界液体折射率, 测量范围为 1.3725~1.4620, 并采用最小二乘法进行线性拟合, 结果表明, 灵敏度为 152.237 nm/RIU。与一般的 SMS 结构的折射率传感器相比, 具有制作简单、成本低和结构稳固、灵敏度高的优点, 在生物化学领域有比较好的应用前景。

参 考 文 献

- Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Zhou Zude, *et al.*. Research progress in fiber-Bragg-grating accelerometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060001.
- 郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 光纤布拉格光栅加速度传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060001.
- Liang Houhui, Jin Yongxing, An Jiali, *et al.*. Temperature-independent humidity sensor based on polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s114001.
- 梁厚慧, 金永兴, 安佳丽, 等. 基于光纤环镜的温度不敏感相对湿度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s114001.
- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na, *et al.*. A quasi-distributed

的关系图。为了讨论谐振波长与液体折射率之间的关系, 采用最小二乘法进行线性拟合。获得拟合的线性系数 R^2 为 0.985, 说明折射率与波长漂移有很好的线性关系; 其线性拟合的斜率为 152.237, 说明传感器具有很好的灵敏度。

用该传感器进行温度测量的结果如图 5 所示。将传感器置于水浴箱中, 然后将水加热就可以测量传感器对不同温度的响应。图 5(a) 为不同温度下的透射光谱, 图 5(b) 为谐振波长与温度变化的关系图。由结果可知, 随着温度的升高, 谐振波长向长波长方向移动, 并且该传感器的温度灵敏度为 0.03937 nm/°C。该折射率传感器的温度交叉灵敏度为 2.6×10^{-4} RIU/°C (RIU 为折射率单位), 因此温度变化很小时, 对折射率测量的影响可以忽略。

optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(12): 1955-1958.

徐平, 庞拂飞, 陈娜, 等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 1955-1958.

4 W Liang, Y Huang, Y Xu, *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(15): 151122.

5 Sun Guodan, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Dual-wavelength sampled fiber Bragg grating by changing refractive index of fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405001.

孙幅丹, 王荣, 蒲涛, 等. 改变光栅折射率实现双波长采样光栅的方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405001.

6 A N Chryssis, S M Lee, S B Lee, *et al.*. High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(6): 1253-1255.

7 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905003.

王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905003.

8 D W Kim, F Shen, X Chen, *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a reflection-mode long-period grating and an intrinsic Fabry-Perot interferometer sensor[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 3000-3002.

- 9 L Rindorf, O Bang. Highly sensitive refractometer with a photonic crystal-fiber long-period grating[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(6): 563–565.
- 10 Saurabh Mani Tripathi, Wojtek J Bock, Arun Kumar, *et al.*. Temperature insensitive high-precision refractive-index sensor using two concatenated dual-resonance long-period gratings[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(10): 1666–1668.
- 11 Jiang Qi, Hu Debo. A comparative study of refractive index sensors based on bare TFBG and SPR-TFBG [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080602.
蒋 奇, 胡德波. 基于倾斜光纤光栅及其表面等离子效应的折射率传感比较研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080602.
- 12 Rajan Jha, Joel Villatoro, Gonçal Badenes, *et al.*. Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 617–619.
- 13 W Yuan, G E Town, O Bang. Refractive index sensing in an all-solid twin-core photonic bandgap fiber[J]. *IEEE Sens J*, 2010, 10(7): 1192–1199.
- 14 Zhao Yu, Jin Yongxing, Dong Xinyong, *et al.*. Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors[J]. *Chinese J 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.

栏目编辑:王晓球