

文章编号:1004-4213(2011)12-1881-3

基于薄芯光纤模态干涉技术的折射率 传感特性实验研究

吴浩伟, 应朝福, 彭保进, 徐斐, 赵亚辉

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要:报道了一种具有微结构缺陷的折射率传感器, 并对其折射率特性进行了实验研究. 将一部分薄芯光纤熔接于标准单模光纤中, 由于插入的薄芯光纤和单模光纤纤芯失配, 导致包层的高次模被激发并与纤芯模在单模光纤内形成干涉仪. 通过减小薄芯光纤的包层直径, 以增强包层中的传输模在环境中的倏逝场, 从而提高对环境折射率测量的灵敏度. 实验表明, 该折射率传感器具有损耗低、成本低、灵敏度高和线性度好等特点.

关键词: 光纤光学; 光纤传感; 折射率测量; 薄芯光纤; 干涉仪

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114012. 1881

0 引言

折射率传感技术在环境监测、医学诊断、石油化工等应用领域具有重要的研究意义, 尤其是在某些易燃、易爆或电磁干扰严重的场合, 光纤传感测量的实时监控技术将具有关键的作用. 随着基于折射率传感的光纤传感生化探测技术的深入研究, 作为一种折射率传感器, 长周期光纤光栅 (Long-Period Fiber Gratings, LPGs) 由于其谐振波长易受外界折射率影响而受到了广泛的关注^[1-4]. 但 LPG 的高温交叉敏感性及高制作成本等因素又严重制约了光纤传感器技术的深入研究和推广应用. 而光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Gratings, FBG) 的耦合光仅发生于纤芯模之间, 在包层不改变的前提下, 本质上是对外界折射率不敏感的. 对于改变包层后, 基于纤芯模式的光纤布喇格光栅折射率传感也有报道^[5-8], 但是它们极易受到环境温度等因素的影响, 而且制作困难. 因此, 如何提高折射率传感的灵敏度, 解决折射率传感中的温度交叉敏感效应和降低制作成本成为当前光纤传感生化探测技术的主要问题.

作为一种新型的传感器件, 光纤纤芯失配干涉仪在传感等领域引起了很大的研究兴趣^[9-14]. 由于在单模光纤中插入一段多模光纤或薄芯光纤, 导致了多模之间或沿纤芯传播的基模和包层模发生干涉, 而外界环境 (温度、应力、弯曲曲率、折射率等) 会影响它们的相位差, 使得谷值波长产生位移, 从而实

现测量.

本文充分利用光纤纤芯失配产生的干涉特性, 设计了一种在单模光纤中插入一段薄芯光纤, 采用 HF 酸溶液腐蚀的方法得到具有不同包层直径的薄芯光纤, 从而实现折射率测量的传感系统. 该装置具有测量准确、灵敏度高、操作简单、成本低廉等优点.

1 传感原理

折射率传感器的结构如图 1 所示. 光纤上相距一定距离的两段单模光纤中插入一段薄芯光纤, 构成一个相位干涉仪, 由于在传感光纤的第一个联结处模式失配, 导致单模光纤包层的高次模被激发. 激发的包层模与沿纤芯传输的纤芯模重新耦合到单模光纤内并形成干涉条纹.

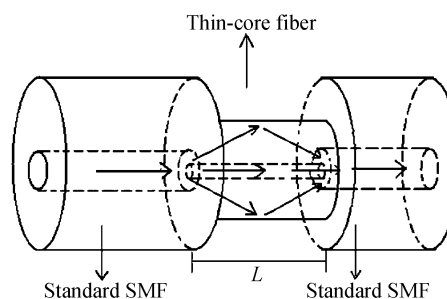


图 1 折射率传感示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the present sensor

当两种模式重新在单模光纤中耦合时, 测量的光强为

基金项目: 浙江师范大学光电信息创新团队和浙江省金华市科技计划项目 (No. 2009-1-092) 资助

第一作者: 吴浩伟 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电技术. Email: wuhaoweissg@sina.com

导师 (通讯作者): 应朝福 (1964-), 男, 副教授, 主要研究方向为全息技术、光电检测、微衍射元件设计. Email: ying@zjnu.cn

收稿日期: 2011-07-13; 修回日期: 2011-09-03

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi\Delta n L}{\lambda}\right] \quad (1)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为沿纤芯和包层传播的两路光强, I 为测得的光功率, L 为薄芯光纤的长度, λ 为光在真空中的波长, Δn 为纤芯和包层折射率之差. 由式(1)可知沿两路传输产生的相位差为

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi\Delta n L}{\lambda} \quad (2)$$

根据干涉仪原理, 当某一波长处的 $\Delta\Psi$ 为 $2\pi N$ ($N=1, 2, 3, \dots$) 时, 该波长对应于某一干涉谷值, 其谷值波长为

$$\lambda = \frac{\Delta n L}{N} = [n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl},j}(\lambda, n_{\text{ext}})] \frac{L}{N} \quad (3)$$

式中 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda)$ 为纤芯模的有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},j}$ 为包层模的第 j 阶次模的有效折射率, n_{ext} 为环境折射率.

由式(3), 当环境折射率 n_{ext} 或薄芯光纤长度 L 变化时, 干涉峰对应的波长漂移, 但增大 L 会增加传感器的体积, 因此, 可以通过改变 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},j}(\lambda, n_{\text{ext}})$ 来考虑, 实验是通过腐蚀包层的厚度让待测液体充当包层, 所以最终通过改变 n_{ext} 来考虑. 根据光纤理论, 包层模的有效折射率随着包层直径的减小而变大, 而芯层模的有效折射率变化很微小, 从而达到增大 Δn 目的. 理论表明, 通过减小薄芯光纤包层直径能够提高传感器的灵敏度.

2 实验及讨论

图 2 为包层腐蚀及折射率传感特性的测量装置. 包层腐蚀时, 槽中注入 HF 酸溶液, 经过一定时间腐蚀后, 用去离子水清洗干净并用光学显微镜测量其直径的大小. 测量折射率传感特性时, 槽中注入不同的折射率匹配液, 实验时采用分析纯蔗糖在室温环境中配制了几组折射率为 1.333 2~1.390 0 的折射率匹配液. 用于制作折射率传感器的标准单模光纤采用的是 Corning SMF-28e, 其纤芯直径为 9 μm . 薄芯光纤采用的是 Nufern 460-HP, 长度为 2 cm, 其纤芯直径约为 3 μm , 它们的包层直径均为

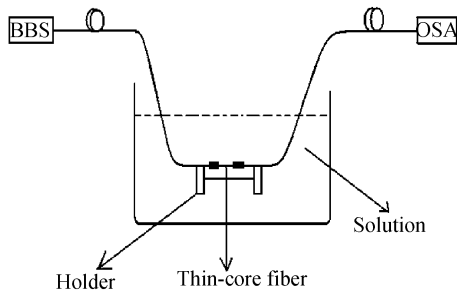


图 2 腐蚀以及折射率传感装置
Fig. 2 Experimental setup of etching and refractive index sensitivity

125 μm . 实验用宽带光源 (BBS) 有效带宽 40 nm (C 波段), 采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪 (OSA) 监测光纤熔接、腐蚀过程中以及处于不同折射率溶液中透射谱的变化情况. 薄芯光纤由夹持器固定于一块塑料板上以避免弯曲、应变的影响, 然后浸入浓度可调的蔗糖溶液中, 监测不同包层直径的薄芯光纤在不同折射率溶液中的敏感情况.

为了比较薄芯光纤直径减小对折射率灵敏度的影响, 分别制作并测量了没有经过腐蚀的传感器 (包层直径为 125 μm) 和经 HF 酸溶液对包层腐蚀一定时间后 (包层直径为 91 μm) 的薄芯光纤传感器的透射谱, 如图 3. 图中 A 和 B 分别为未腐蚀和腐蚀后谷值.

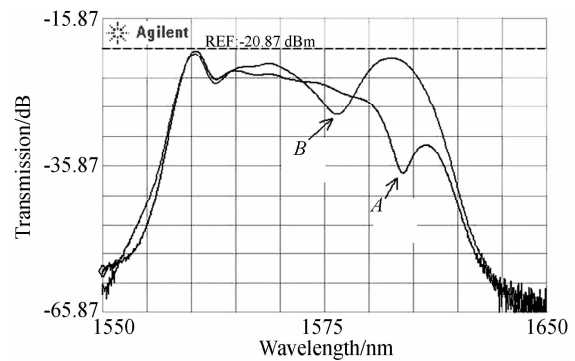


图 3 传感器透射谱
Fig. 3 Measured transmission spectra of the sensor

2 个传感器被平行的固定在空槽中的塑料板上, 分别向空槽中注入不同折射率的标准折射率液体并测定传感器谷值波长的移动量. 由于温度的变化会给折射率的测量引入误差, 为了避免折射率与温度的交叉敏感, 整个测试过程处在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境中.

图 4 是传感器谷值波长随着环境折射率变化图. 当环境折射率从 1.332 0 变为 1.386 7 时, 经过腐蚀的传感器的谷值波长向短波方向移动了 10.58 nm, 而没有腐蚀的移动了 7.87 nm. 说明通过减小薄芯光纤的包层直径可以提高传感器波长对环境折射率的灵敏度. 数据表明, 谷值对应的波长变化与曲率呈良好的线性关系, 未腐蚀和腐蚀后曲线拟合度分别为 0.985 5 和 0.968 1, 若波长测量精度为 1 pm, 可以计算出折射率测量精度可达 5.17×10^{-6} . 其中未被腐蚀的拟合方程为

$$y = 142.29544x - 189.82127$$

未被腐蚀的折射率传感器的灵敏度实验值为 $K_{\text{RI}} = 142.295 \text{ nm/R.I.U}$

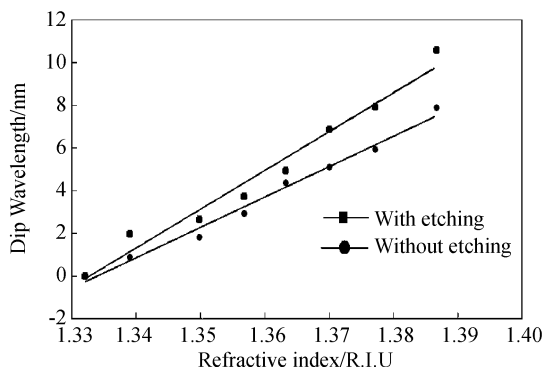


图4 传感器谷值波长随折射率变化曲线

Fig. 4 Measured peak wavelength shift with respect to the change of refractive index

4 结论

研究了基于不同包层直径的薄芯光纤的折射率传感特性. 通过 HF 酸溶液腐蚀包层使得包层直径减小的方法来提高对外界折射率传感的灵敏度. 腐蚀前后的灵敏度系数分别为 142.295 nm/R. I. U 和 182.328 nm/R. I. U, 线性拟合度分别为 0.985 5 和 0.968 1, 干涉峰波长随外界折射率变化呈现良好的线性关系. 所研制的折射率传感具有体积小、制作过程简单、成本低、灵敏度高和可以大批量生产等优点, 在折射率测量领域有很好的应用前景.

参考文献

- [1] ZHANG Zi-jia, XU An-tao. Sensitivity of the thin-cladding long period fiber gratings to refractive index[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, **22**(8): 1105-1108.
张自嘉, 许安涛. 薄包层长周期光纤光栅的折射率传感特性[J]. *传感技术学报*, 2009, **22**(8): 1105-1108.
- [2] LIANG Hui, ZENG Qing-ke, QIN Zi-xiong, et al. Sensitivity of long period fiber grating to refractive index[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(1): 111-114.
梁辉, 曾庆科, 秦子雄, 等. 长周期光纤光栅的折射率敏感特性[J]. *应用光学*, 2011, **32**(1): 111-114.
- [3] YAN Jin-hua, JIANG Meng. A high-sensitivity refractive-index sensor using LPG[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(2): 178-179.
严金华, 姜萌. 一种基于 LPG 的高灵敏度折射率传感器[J]. *光电子 · 激光*, 2008, **19**(2): 178-179.
- [4] SHU Xue-wen, ZHANG Lin, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(2): 255-266.
- [5] LUO Bin-bin, ZHAO Ming-fu, ZHOU Xiao-jun, et al. Theoretical model and design of single-end etched fiber Bragg grating in low refractive-index area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406004-1~0406004-6.
罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 单端腐蚀光纤布喇格光栅在低折射率区的理论模型及设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406004-1~0406004-6.
- [6] YUN Bin-feng, CHEN Na, CUI Yi-ping. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013-1015.
恽斌峰, 陈娜, 崔一平. 基于包层模的光纤布喇格光栅折射率传感特[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1013-1015.
- [7] LIU Lin-he, CHEN Zhe, BAI Chun-he, et al. The effect of refractive index of material overlaid side polished area of FBG on Bragg wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 865-868.
刘林和, 陈哲, 白春河, 等. 侧面抛磨锚区材料折射率对光纤光栅波长的影响[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 865-868.
- [8] SHEN Le, ZHENG Shi-lie, ZHANG Xian-min. The response of side-polished FBG to external refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1036-1038.
沈乐, 郑史烈, 章献民. 侧面研磨光纤 Bragg 光栅的外部折射率敏感特性研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1036-1038.
- [9] WU Qiang, SEMENOVA Y, MATHEW J, et al. Humidity sensor based on a single-mode hetero-core fiber structure[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(10): 1752-1754.
- [10] WU Qiang, HATTA A M, SEMENOVA Y, et al. Use of a single - multiple - single - mode fiber filter for interrogating fiber Bragg grating strain sensors with dynamic temperature compensation [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29): 5451-5458.
- [11] HATTA A M, FARREL G, WANG Peng-fei, et al. Misalignment limits for a singlemode-multi-mode-singlemode fiber-based edge filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(13): 2482-2488.
- [12] WU Qiang, SEMENOVA Yuliya, WANG Peng-fei, et al. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9): 7937-7944.
- [13] GU Bo-bo, YIN Ming-jie, ZHANG A-ping, et al. Low-cost high-performance fiber-optic pH sensor based on thin-core fiber modal interferometer [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 22296-222302.
- [14] YU Liu, LI Wei. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded- index multimode fibers [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(13): 2516-2519.

Experimental Research of Refractive-Index Sensing Properties Based on Thin-core Fiber Modal Interferometer

WU Hao-wei, YING Chao-fu, PENG Bao-jin, XU Fei, ZHAO Ya-hui

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: A refractive-index sensor with micro-structured defect was proposed and demonstrated, and its refractive-index characteristics were studied experimentally. After inserting a segment of thin-core fiber into a standard single-mode fiber, high-order cladding modes were excited and interfered with the core mode to form an in-fiber modal interferometer because of the mismatch between thin-core fiber and standard single-mode fiber. By decreasing of the cladding-diameter of the thin-core fiber, the evanescent field of the cladding modes was enhanced, which improved the sensitivity of refractive-index. Experimental results show that the proposed device has advantages of low loss, low cost, high sensitivity and good linearity.

Key words: Fiber optic; Optical fiber sensor; Refractive-index measurement; Thin-core fiber; Interferometer