

文章编号: 0253-2239(2006)07-1013-3

基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性*

恽斌峰 陈 娜 崔一平**

(东南大学电子工程系先进光子学中心, 南京 210096)

摘要: 提出了基于光纤布拉格光栅(FBG)包层模式的折射率传感方案。实验中,利用不同浓度的丙三醇水溶液作为外界折射率传感溶液,采用氢氟酸溶液化学腐蚀的方法来减小光纤包层的直径以增大包层模式对外界折射率的敏感度,研究了腐蚀后光纤布拉格光栅包层模式的耦合波长对外部折射率的变化关系。实验结果表明在 1.3300~1.4584 的折射率范围内,包层模式耦合波长随外界折射率增大而增大,在接近光纤包层折射率处具有很高的折射率灵敏度,最大达到了 172 nm/riu (refractive index unit)。而且,包层模谐振的光谱半峰全宽(约 0.07 nm)仅为布拉格纤芯模谐振光谱半峰全宽的 1/4,能够获得更好的传感精度。

关键词: 光纤光学; 折射率传感器; 腐蚀; 包层模

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Refractive Index Sensing Characteristics of Fiber Bragg Grating Based on Cladding Mode

Yun Binfeng Chen Na Cui Yiping

(Advanced Photonics Center, Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: A new refractive index sensing scheme based on the cladding modes of fiber Bragg grating (FBG) is presented. In the experiments, glycerin aquatic solutions with different concentrations are used as the external refractive index sensing media, and the cladding diameter of FBG is reduced by etching the fiber with HF solution to enhance the sensitivity of cladding modes to the external refractive index. Dependence of the coupling wavelength of the etched FBG cladding mode on the external refractive index is measured. The results show that in the refractive index range of 1.3300~1.4584, the coupling wavelength of cladding mode shifts longer with the increase of the external refractive index and a higher sensitivity is achieved when the external refractive index is close to that of fiber cladding's, and the maximum refractive index sensitivity reaches 172 nm/riu (refractive index unit). Furthermore, the full-width-at-half-maximum (FWHM) of resonant cladding mode is 0.07 nm, which is about 1/4 of that of the core mode's. With this narrower spectrum, a higher sensing resolution can be achieved.

Key words: fiber optics; refractive index sensor; etch; cladding mode

1 引 言

光纤布拉格光栅传感器是一种新颖的光纤传感器,作为波长编码型光纤传感器,它已经被广泛应用于应变、温度等物理量的传感测量^[1~4]。长周期光纤光栅(LPG)由于其谐振波长受外部折射率影响,所以作为折射率传感器得到了广泛的研究^[5~7],但

是由于长周期光纤光栅的光谱带宽在几十纳米的量级,测量精度受到了很大的限制。基于纤芯模式的光纤布拉格光栅折射率传感已经有相关报道^[10~13],但是光纤布拉格光栅的包层模式的折射率特性尚未有研究,本文提出基于光纤布拉格光栅(FBG)包层模式的折射率传感方案。

* 江苏省自然科学基金(BK2004207)和国家杰出青年科学基金(60125513)资助课题。

作者简介: 恽斌峰(1979~),男,江苏常州人,东南大学电子工程系博士研究生,主要从事光纤光栅的传感应用技术研究。
E-mail: ybf@seu.edu.cn

** 通信联系人。E-mail: cyp@seu.edu.cn

收稿日期: 2005-10-18; 收到修改稿日期: 2005-12-12

2 原 理

光纤布拉格光栅包层模式的谐振波长由下式决定^[14]:

$$\lambda_{\text{FBG}m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff}m}^{\text{cl}}) \Delta_{\text{FBG}}, \quad (1)$$

其中 $\lambda_{\text{FBG}m}$ 是第 m 阶包层模式的谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{FBG}m}^{\text{cl}}$ 分别是纤芯模式的有效折射率和第 m 阶包层模式的有效折射率, Δ_{FBG} 是光纤布拉格光栅的折射率调制周期。根据光纤三层模型的光纤布拉格光栅包层模式分析^[15] 和有限包层光纤布拉格光栅的理论分析^[16] 可知, $n_{\text{eff}m}^{\text{cl}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 都随外界折射率变化而变化, 通过腐蚀光纤, 包层的直径大大减小, 包层模式受外界折射率的影响增强, 从而增强了包层模式的谐振波长对外界折射率的灵敏度, 通过测量包层模式谐振波长的偏移量, 就可以实现高灵敏度的折射率传感。

3 实 验

实验中采用倍频氦离子激光器和相位掩模板在型号为 PS-RMS-30 的非包层模抑制光敏光纤上刻制了光纤布拉格光栅, 布拉格纤芯模式的谐振波长在 1550.24 nm, 半峰全宽为 0.3 nm, 同时存在上百个包层模式, 包层模式的光谱半峰全宽约为 0.07 nm, 是纤芯模式的 1/4, 但包层模的透射损耗比较小, 约为 1 dB 左右, 通过腐蚀光纤布拉格光栅使光纤的包层直径减小, 可以增强包层模光能量到外界的耦合, 从而增强包层模式的损耗。首先将光纤布拉格光栅放在质量分数为 40% 的氢氟酸中腐蚀 45 min, 包层直径减小到十几微米^[8]。随着包层直径的减小, 高阶包层模式变成辐射模, 光栅中的包层模式数也逐渐减少, 实验得到腐蚀后包层模式的光谱图如图 1 所示, 经腐蚀后只留下了七阶包层模, 采用透射率最大的第四阶包层模进行折射率传感, 它的透射损耗达到 6.5 dB, 完全满足传感应用的要求。

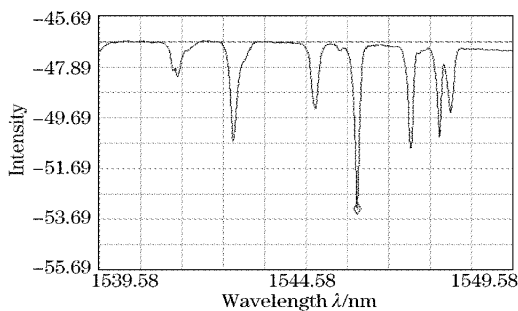


图 1 腐蚀后光纤布拉格光栅的包层模式光谱图

Fig. 1 Spectrum of cladding modes of FBG after etching

因为包层模式的光谱半峰全宽为 0.07 nm, 接近光谱仪的分辨力, 所以采用基于可调谐激光器的光波测试系统 (Agilent 8164A) 进行折射率传感, 实验装置如图 2 所示。实验中, 随着外界折射率的增大, 光纤包层折射率和外界折射率之间的差越来越小, 从而导致光纤布拉格光栅中的一些高阶包层模转变为辐射模而消失。而残留的包层模随着外界折射率和光纤包层折射率差的减小, 使越来越多的光能量耦合到外界, 从而随着外界折射率的增大, 光纤布拉格光栅存在的包层模数越来越少, 包层模的透射损耗略有增大, 而包层模的带宽基本不变。

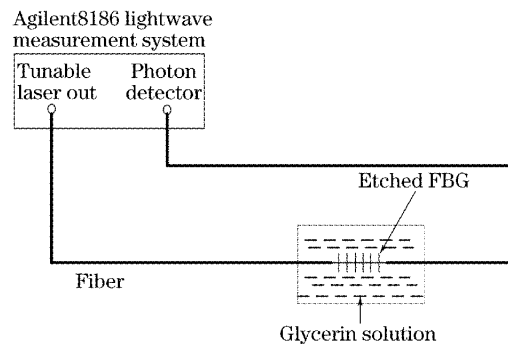


图 2 折射率传感实验系统图

Fig. 2 Experimental setup of refractive index sensing

在保证第四阶包层模存在的前提下, 通过采用不同浓度的丙三醇水溶液来改变外界折射率, 通过测量不同外界折射率中第四阶包层模式的谐振波长偏移来进行折射率传感实验。第四阶包层模式谐振波长的偏移量随外界折射率的关系曲线如图 3 所示, 从图中可以看出, 随着外界折射率的增大, 第四阶包层模式的谐振波长向长波长方向移动, 且外界折射率越接近光纤包层折射率, 包层模式的折射率灵敏度越大。从图 4 可以看出, 在接近光纤包层折

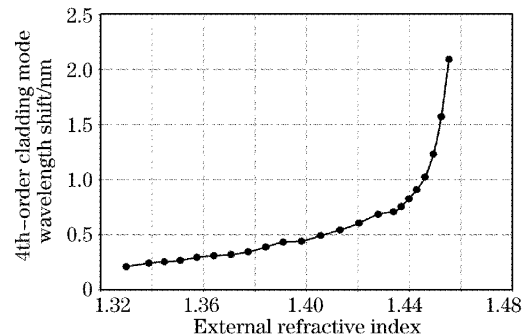


图 3 第四阶包层模式谐振波长偏移量和外部折射率的关系图

Fig. 3 Relation between the resonance wavelength shifts and the external refractive index for the fourth order cladding mode

射率范围内,第四阶包层模式有很高的折射率灵敏度,最大灵敏度达到 172 nm,大于文献[8]中实现的 7.3 nm 和文献[9]中实现的 71.2 nm 的折射率灵敏度。

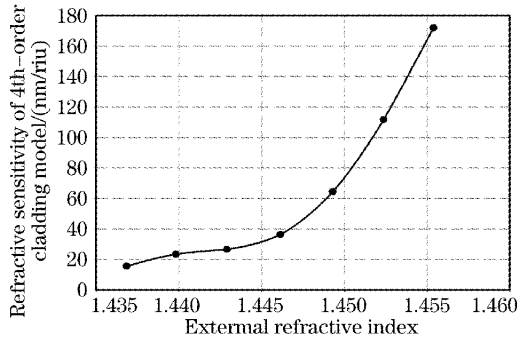


图 4 第 4 阶包层模式的折射率灵敏度图

Fig. 4 Refractive index sensitivity of the fourth order cladding mode

4 结 论

通过氢氟酸腐蚀光纤减小光纤包层直径来增大包层模式对外界折射率的敏感度,利用不同浓度的丙三醇水溶液来改变外界折射率,研究了腐蚀后包层模式的耦合波长对外部折射率的关系。与其他基于布拉格光栅的折射率传感技术相比,具有工艺简单,腐蚀后的光栅具有更好的机械强度,不易断裂以及光谱带宽小,分辨率高的优点。

参 考 文 献

- Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- Huang Chong, Cai Haiwen, Geng Jianxin *et al.*. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a 3×3 fiber coupler for fiber Bragg grating sensors[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1397~1400 (in Chinese)
黄冲,蔡海文,耿建新等. 基于3×3耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1397~1400
- Yu Youlong, Liu Shenchun, Hwayaw Tam *et al.*. Time-domain addressing technique for fiber Bragg grating sensor system with the function of real-time monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 865~868 (in Chinese)
余有龙,刘盛春,谭华耀等. 具有实时监测能力的光纤光栅传感系统时域地址查询技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 865~868
- Xiaomei Liu, Shilie Zheng, Xianmin Zhang *et al.*. Bragg grating chemical sensor with hydrogel as sensitive element [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12): 683~685
- Heather J. Patrick, Alan D. Kersey, Frank bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1606~1612
- R. Falciai, A. G. Mignani, A. Vannini. Long period gratings as solution concentration sensors [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, **74**(1~3): 74~77
- Xuwen Shu, Lin Zhang, Ian Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 255~266
- D. A. Pereira, O. Frazao, J. L. Santos. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(2): 299~304
- Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15): 151122-1~151122-3
- K. Schroeder, W. Ecke, R. Mueller *et al.*. A fiber Bragg grating refractometer [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 757~764
- Shen Le, Zheng Shilie, Zhang Xianmin. The response of side-polished FBG to external refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1036~1038 (in Chinese)
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
- K. Zhou, X. Chen, L. Zhang *et al.*. High-sensitivity optical chemsensor based on etched D-fibre Bragg gratings [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(4): 232~234
- G. Laffont, P. Ferdinand. Titled short-period fiber-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 765~770
- James A. Besley, Teresa Wang, Laurence Reekie. Fiber cladding mode sensitivity characterization for long-period gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(3): 848~853
- Turan Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- Zhang Xia, Xia Yuchui, Huang Yongqing *et al.*. Analysis of shift in Bragg wavelength of fiber Bragg gratings with finite cladding radius [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 222~224 (in Chinese)
张霞,夏月辉,黄永清. 有限包层半径光纤 Bragg 光栅的理论研究 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(2): 222~224