

# 不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性

苗银萍 刘 波 赵启大

(南开大学现代光学研究所教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 倾斜光纤光栅的透射谱中有纤芯模和大量的包层模,它们具有与布拉格光栅相同的温度特性。利用 HF 酸腐蚀的方法得到具有不同包层直径的倾斜光纤光栅,研究了其对外界折射率的传感特性。结果表明,外界环境折射率在 1.333~1.4532 之间变化时,同一直径倾斜光纤光栅的高阶包层模的敏感性要比低阶包层模强;随着包层直径的减小,包层模的敏感性增强,且在折射率比较高的环境中更有更高的敏感性。因此,利用倾斜光纤光栅的温度特性不仅可以解决温度交叉敏感问题,而且通过不同的腐蚀程度能定制所需要的灵敏度,以实现对环境折射率的高灵敏度测量。该方法可应用于对生物和化学等高灵敏度传感领域的各种溶液进行实时监控。

**关键词** 光纤传感; 折射率传感; 包层模耦合; 倾斜光纤光栅

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2072

## Refractive Index Sensing Characteristic of Tilted Fiber Bragg Gratings with Different Cladding-Diameters

Miao Yinping Liu Bo Zhao Qida

(Key laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Short-period fiber Bragg gratings with gratings planes tilted at a weak angle corresponding to the fiber axis show core mode, as well as a large number of cladding-mode resonances in transmission. Tilted fiber Bragg grating (TFBG) with different cladding diameters is achieved after the cladding of the tilted fiber Bragg grating is etched by hydrofluoric, and then the sensitivity of refractive index is investigated. While the surrounding refractive index changes from 1.333 to 1.4532, the high-order cladding modes are more sensitive than the low-order ones for the same diameter. The sensitivity of the cladding modes is enhanced with the decrease of cladding diameter, and it is custom-built more sensitive to surrounding refractive index. Therefore, this way not only can solve temperature-crossing sensitivity problem, but also can satisfy the custom-built sensitivity in the real-time monitoring systems by etching the clad of TFBG in different degrees. It can be applied to biochemical environmental sensing and concentration measurement of chemical solutions.

**Key words** optical fiber sensing; refractive index sensing; cladding-mode coupling; tilted fiber Bragg grating

## 1 引 言

目前,折射率传感技术在环境监测、医学诊断、石油化工等生化应用领域具有重要的研究意义,由于这些领域的周围环境大多是易燃、易爆或电磁干

扰严重的场合,因此光纤光栅测量技术在其领域的实时监控将具有关键的作用。基于折射率传感的光纤光栅生化探测技术正处于不断深入的研究之中。长周期光纤光栅(LPG)由于其谐振波长易受外界

**收稿日期**: 2008-03-31; **收到修改稿日期**: 2008-05-22

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA01Z217)、国家自然科学基金重点项目(60736039,60572018)和天津市科技计划项目科技攻关项目(07ZCKFGX00200)资助课题。

**作者简介**: 苗银萍(1980—),女,博士研究生,主要从事光纤通信与光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: kikosi@126.com

**导师简介**: 赵启大(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事声光信息处理、光纤通信与光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: zhaoqd@nankai.edu.cn

折射率影响,作为折射率传感器得到了广泛的研究<sup>[1~5]</sup>。然而 LPG 的光谱带宽在几十纳米的量级、本身的温度交叉敏感性较高、长度易导致应力、弯曲等因素都会降低它对溶液实时监控的精确性。而布拉格光栅光纤(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拉格光栅折射率传感也有报道<sup>[6~11]</sup>,但是它们极易受到环境温度等因素的影响。因此,如何提高光纤光栅折射率传感的灵敏度和解决折射率传感中的温度交叉敏感效应成为当前光纤光栅生化传感领域中的两个主要问题。

倾斜光纤光栅作为一种新型的光纤光栅应运而生,其特殊的结构与性质使其具有 FBG 与 LPG 的双重优点。由此构成更精确的折射率传感仪在生化传感等领域将能得到更为广泛的应用。对于倾斜光纤光栅传感特性已有一些研究<sup>[12,13]</sup>,但如何提高其对外界不同折射率环境的灵敏度和解决温度交叉敏感效应方面的研究还未见报道。

本文用 HF 酸溶液腐蚀的方法得到具有不同包层直径的倾斜光纤光栅,研究了其腐蚀前后的温度特性和折射率传感特性;并对不同直径的同一阶包层模式与同一直径的不同阶包层模式对外界不同折射率环境的敏感性进行了分析。

## 2 折射率传感机理

倾斜光纤光栅(Tilted fiber Bragg grating, TFBG)是一种短周期光纤光栅,其结构如图 1 所示。由于栅面发生倾斜,前向传导的入射光除了部分耦合为满足布拉格条件的后向传导的纤芯模外,其它的还将耦合为一系列后向传导的包层模。满足相位匹配条件<sup>[14]</sup>:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff,core}} \frac{\Lambda}{\cos \theta}, \tag{1}$$

$$\lambda_{\text{coupling},i} = (n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,clad},i}) \frac{\Lambda}{\cos \theta},$$

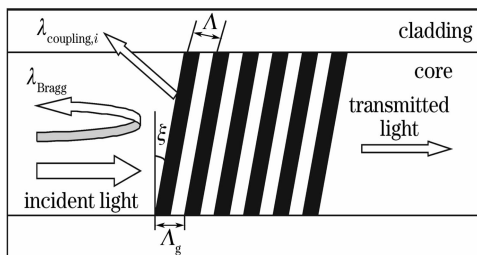


图 1 倾斜光纤光栅的结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of a TFBG

式中  $n_{\text{eff,core}}$  为纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  为沿纤芯方向栅格的周期, 栅面倾斜角度为  $\theta$ , 沿纤芯方向栅格周期  $\Lambda_g$ ,  $n_{\text{eff,clad},i}$  为第  $i$  阶包层模的有效折射率。

因此,在其透射谱中除了有布拉格谐振峰外,还有一系列的包层模谐振峰,如图 2 所示。相位匹配条件的变化将会引起耦合谐振峰中心波长的改变,而纤芯模是由前向芯模和后向芯模耦合而成,一般情况下只与纤芯有效折射率有关。相对于纤芯模,包层模不仅与纤芯的有效折射率有关,还取决于包层的有效折射率,而包层模的有效折射率依赖于包层折射率和围绕着包层介质的折射率之差。在给定纤芯折射率和光纤直径的情况下,外界环境折射率的变化会使得包层模的有效折射率也发生改变,从而引起包层模传播模式的谐振波长的漂移。因而能够通过检测包层模谐振峰的变化实现其所处环境折射率的感测,而且通过改变包层直径的方法可以进一步提高传感灵敏度。

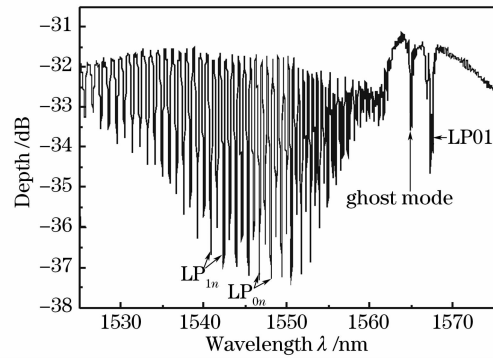


图 2 倾斜光纤光栅的透射谱  
Fig. 2 Normalized transmission spectrum of a TFBG

## 3 实验描述与讨论

实验所用的倾斜光纤光栅是利用相位掩模侧面辐射技术,在写入过程中将模板倾斜一定的角度,通过准分子激光紫外写入载氢的掺锗单模光纤得到。本研究所用的倾斜光纤光栅长度为 1.3 cm,有效倾

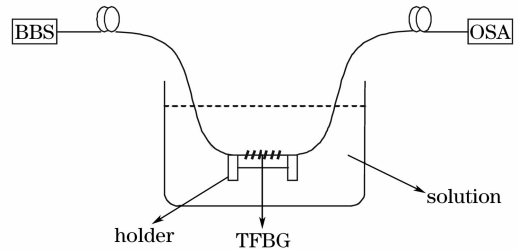


图 3 腐蚀以及折射率传感装置  
Fig. 3 Experimental setup of etching and refractive index sensitivity

斜角度为  $8^\circ$ 。实验用宽带光源(BBS)有效带宽 40 nm (C 波段),分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪(OSA)监测光栅在写入、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。HF 酸溶液对光栅包层的腐蚀与折射率传感特性的装置相似,经过不同时间腐蚀后,多次用去离子水清洗干净并用光学显微镜测量其直径的大小,分别置于温控箱中研究在温度变化范围为  $30^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$  时的敏感特性。采用分析纯蔗糖在室温环境中配置标准折射率匹配液,实验中采取折射率从 1.3330~1.4532 的几组不同折射率匹配液。折射率传感特性的研究装置如图 3 所示。光纤中光栅由夹持器固定于一块塑料板子上以避免弯曲、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光纤光栅在不同折射率溶液中的敏感情况。

经过用 HF 对包层腐蚀不同时间后,包层直径分别为  $125\ \mu\text{m}$ 、 $90\ \mu\text{m}$  和  $50\ \mu\text{m}$  的倾斜光纤光栅的透射谱如图 4 所示。从图 4 可以看出,由于芯层导模的绝大部分能量限制在光纤的芯层,所以布拉格谐振峰几乎不受外界环境的影响。在本文所研究的包层直径范围内,腐蚀前后纤芯模谐振峰几乎没有发生漂移,与理论分析一致;相对于纤芯模,包层模更容易受到外界环境的影响。随着腐蚀时间的变长,包层直径减小,加强了包层模光能量到外界的耦合,从而增强包层模式的损耗;高阶包层模式变成辐射模,光栅中的包层模谐振峰阶数减少;包层模谐振峰向短波方向移动,对应包层模阶数越高的谐振峰移动得越快。在实际应用中可以选用耦合强度更大的包层模去探测需要灵敏度更高的外界环境。

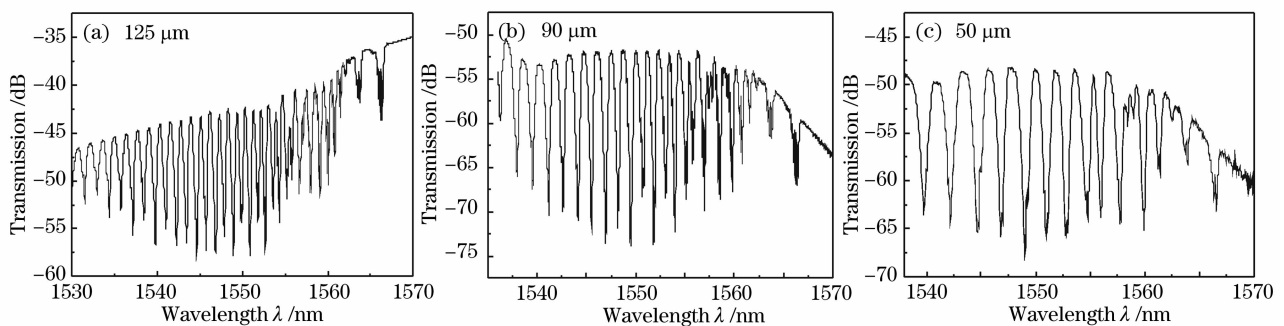


图 4 不同直径时 TFBG 的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of TFBG with different diameters

分别对腐蚀前后的纤芯模和包层模的温度传感特性做了对比,如图 5 所示。实验发现:腐蚀前后,它们的温度特性没有发生变化,即包层模与纤芯模依然具有相同的温度特性,它们之间的间隔没有随温度的改变而变化。所以通过监测包层模与纤芯模谐振峰之间的间隔可以去除折射率变化中的温度效应。

实验中将光栅对不同折射率溶液的敏感特性分为三个阶段:当折射率从 1.3330~1.4200 变化时,包层模谐振峰发生了微弱的蓝移,透射峰强度大幅度下降;当变化范围为 1.4200~1.4532 时,包层模式谐振峰向短波的漂移和透射峰的强度变化情况都很明显。这是因为光纤包层的折射率约为 1.45,当外界折射率近似等于包层折射率时,包层模发生截

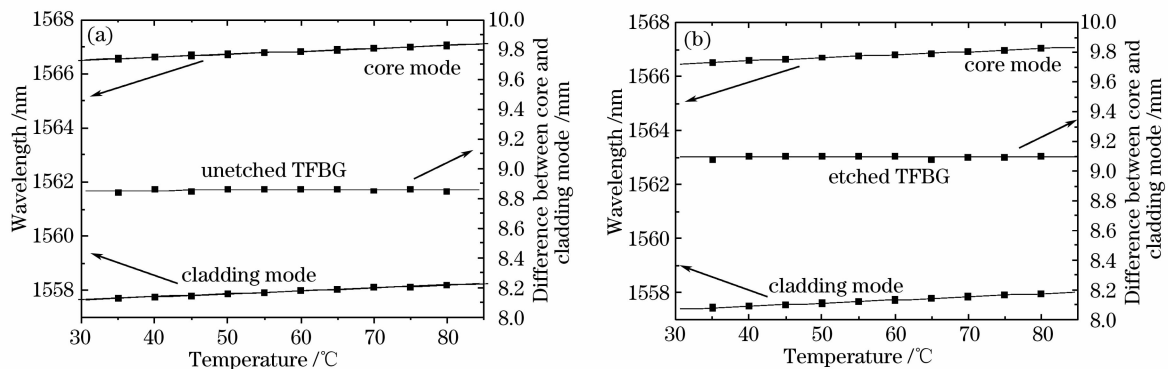


图 5 未被腐蚀与已腐蚀的 TFBG 的温度敏感特性

Fig. 5 Temperature sensitivities of unetched and etched TFBGs

止,不能在光纤包层内传导,此时的耦合峰深度也明显变浅,接近于零。

图 6 给出了包层直径为  $80\ \mu\text{m}$  的光纤光栅处于不同折射率溶液中时,第 3、6、10 阶包层模相对于纤芯模的波长漂移与折射率的变化关系,图 6 中表现出一种非线性关系,随着折射率的增大,高阶包层模漂移得更多,在折射率比较大的溶液中,第 10 阶包层模的波长漂移是第 3 阶包层模的 4 倍。结果表明:在溶液折射率的整个变化过程中,在布拉格波长附近的低阶包层模在整个折射率变化过程中基本保持不变,越高阶的模式谐振峰中心波长移动越明显。即包层模式阶数越高,对外界环境的灵敏度越高,所对应的相对波长变化量越大,也就是高阶包层模比低阶包层模有更高的敏感性。由光纤纤场分布形式可知,光纤对于包层模的束缚性较纤芯模为弱,高阶模的束缚性较低阶模弱。也就是说当环境参数发生变化时,包层模式传播常数、有效折射率等参数的变化要大于芯模,高阶模式各参数的变化大于低阶模式。

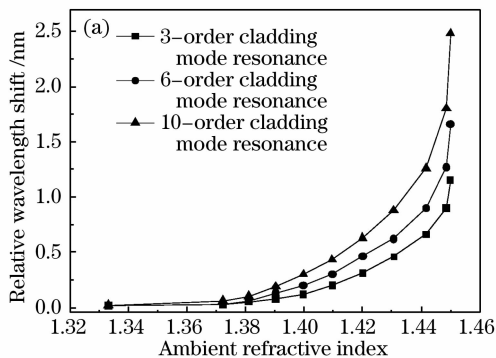


图 6 同一直径不同阶包层模的折射率敏感特性

Fig. 6 Refractive-index sensitivity comparison of the third, the sixth-order and the tenth-order cladding-mode resonance under fiber cladding diameter of  $80\ \mu\text{m}$

同时,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光栅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,灵敏度大大提高。

图 7 给出了同一阶包层模在包层直径分别为  $125\ \mu\text{m}$ 、 $90\ \mu\text{m}$  和  $50\ \mu\text{m}$  时包层模相对于纤芯模的波长漂移与折射率的变化关系。结果显示:当外界环境折射率逐渐增大时,随着包层直径的减小,相对波长的漂移变化的更明显,波长漂移量是原来的 2.2 倍。这是因为包层厚度的减小能够加强 TFBG 对外界环境的敏感度。包层直径的减小使得包层模式

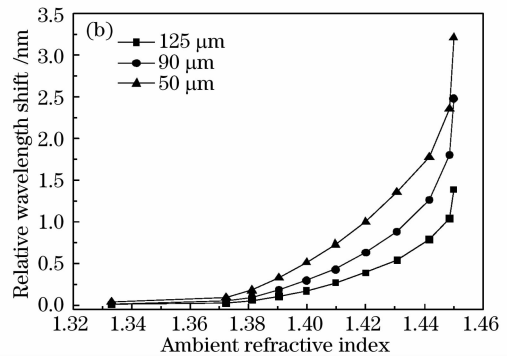


图 7 同一阶包层模不同直径的折射率敏感特性

Fig. 7 Sensing characteristics comparison of the ninth-order cladding-mode resonance under fiber cladding diameter of  $125\ \mu\text{m}$ ,  $90\ \mu\text{m}$  and  $50\ \mu\text{m}$

的光波场有更多的部分分布在外围介质中并与之相互作用,从而提高对外界折射率的灵敏度。同在一种折射率溶液中,对于包层直径小的光栅,波长漂移得更明显。所以通过腐蚀光纤,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。

## 4 结 论

研究了基于不同包层直径的倾斜光纤光栅的折射率传感特性。实验得出 HF 腐蚀其包层前后的纤芯模式与包层模式具有相同的温度敏感特性,以纤芯模与任一包层模之间的中心波长差去探测外界环境的改变能够解决温度交叉敏感效应。随 HF 腐蚀倾斜光纤光栅的包层直径减小,耦合强度增大:一方面可以增大包层模式对外界折射率的敏感度,另一方面透射谱中的包层模谐振峰数大量减少易于辨认。将不同直径的光栅分别置于不同折射率溶液中,研究了包层直径变化前后包层模式的耦合波长与外部折射率的关系:对于同一直径的光栅,高阶包层模式的敏感度要高于低阶包层模式的;对于同一阶层不同直径的情况下,直径比较小的光栅的敏感性要高于直径比较大的光栅。所以在需要高灵敏度监测折射率溶液时,可以通过 HF 酸溶液腐蚀包层使得包层直径减小的方法来提高倾斜光纤光栅对外界折射率传感的灵敏度,而且可以通过不同的腐蚀程度来定制所需要的灵敏度;同时,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、深度高等优点。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 Xuewen Shu, Lin Zhang, Ian Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 255~266
- 4 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 692~694
- 5 K. S. Chiang, Y. Liu, X. Dong. Analysis of etched long-period fiber grating and its response to external refractive index[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **16**: 966~967
- 6 K. Schroeder, W. Ecke, R. Mueller *et al.*. A fiber Bragg grating refractometer[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 757~764
- 7 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
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 Yun Binfeng, Chen Na, Cui Yiping. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013~1015
- 12 恽斌峰,陈 娜,崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1013~1015
- 13 Xu Junjiao, Li Jie, Rong Huabei *et al.*. Analysis and measurement on refractive index sensing of few mode fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 565~568
- 14 徐俊娇,李 杰,戎华北 等. 少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 565~568
- 15 Zhao C L, Yang X F, Demokan M S *et al.*. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3 degrees slanted multimode fiber Bragg grating [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**: 879~883
- 16 Chan C F, Chen C, Jafari A *et al.*. Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**: 1142~1149
- 17 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**: 1760~1773