

# 温度对光纤布喇格光栅化学传感器性能的影响\*

孟照方, 颜玢玢, 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 徐大雄

(北京邮电大学 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:**阐述了光纤 Bragg 光栅化学传感的基本原理, 推导并利用数值计算得出了腐蚀掉包层后的光纤 Bragg 光栅的纤芯有效折射率随外界折射率变化的关系. 分析了温度对这种传感器造成的误差. 研究表明, 温度会造成光纤光栅变化和改变溶液折射率的大小, 从而对传感器的测量造成影响. 设计了一种温度补偿方案. 实验分别研究了低浓度溶液和高浓度溶液中传感头两段不同光栅区的 Bragg 波长随温度的变化. 结果表明: 在清水中, 传感头两段光栅区 Bragg 波长受到温度变化的影响基本相同, 通过测量波长的差值可消除温度的影响; 高浓度溶液中, 传感头受温度影响造成的总波长漂移量约为未被腐蚀光栅区的波长漂移量的 0.6, 与理论的结果基本一致. 传感头受温度影响造成的总波长漂移量可由未被腐蚀光栅区波长漂移量的大小得出, 进而可消除温度对溶液传感的影响.

**关键词:** 光纤布喇格光栅; 化学传感器; 折射率; 温度补偿

**中图分类号:** TP212.2; TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)04-775-5

## 0 引言

近年来, 光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 由于其特有的性质得到了普遍的关注和广泛的应用, 尤其是在传感领域倍受青睐<sup>[1-5]</sup>. 光纤光栅化学传感器是基于光纤光栅布喇格波长对外界物质折射率的敏感特性制成的一种新型的光纤传感器, 可以测量多种化学溶液的浓度, 在环境污染、化学物质检测和生态环境保护中有着广泛的应用. 在光纤布喇格光栅中, 只产生芯模之间的耦合, 由于包层的存在, 它的谐振波长对外界折射率的变化很不敏感, 如果去掉其包层, 光栅的谐振波长对外界折射率变化的敏感性就会大大加强, 采用氢氟酸腐蚀光纤布喇格光栅包层之后, 可以实现其对外界环境折射率的测量, 前人在这方面已做了很多工作<sup>[6-8]</sup>. 但是, 在测量过程中, 温度会引起光栅布喇格波长的漂移, 使传感器产生误差, 影响传感的准确度. 本文就温度对光纤布喇格光栅在化学溶液的测量过程中的影响进行分析, 并设计了一种补偿方案.

## 1 基本原理

在光纤布喇格光栅传感器中, 一般是通过监测 (布喇格波长的移动来判断被测量的变化. 光栅的布

喇格中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中,  $\Lambda$  是布喇格光栅的周期,  $n_{\text{eff}}$  是纤芯的有效折射率.

普通布喇格光栅中, 倏逝波在包层内传输时衰减很快, 无法达到包层, 对外界折射率变化不敏感. 若要测量外界折射率的变化, 必须除去光纤光栅的包层, 这时光栅只是波导结构的弱微扰, 在倏逝波的作用下, 光纤纤芯的有效折射率与外界折射率存在着一定的依赖关系<sup>[9]</sup>. 光纤布喇格光栅导模的有效折射率与归一化频率  $V$  有关, 表示

$$n_{\text{eff}}^2 = n_{\text{co}}^2 - \left(\frac{U}{V}\right)^2 (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2) \quad (2)$$

式中  $n_{\text{co}}$  是纤芯折射率;  $n_{\text{cl}}$  是包层折射率 (原包层腐蚀掉后, 表示的是外界折射率). 利用光纤中基模传输的特征方程可以得出  $U$  和  $V$  的关系, 将其关系代入式 (2), 可得出纤芯有效折射率随外界折射率变化的关系, 表达式较为复杂, 这里略去. 特征方程是一个超越方程, 可利用数值方法求解, 纤芯有效折射率随外界折射率变化的关系也可通过数值计算得出, 如图 1.

化学溶液浓度的变化会引起其折射率的改变, 利用被腐蚀掉包层的布喇格光栅对外界折射率敏感的特性, 可以测量化学溶液的浓度. 光纤光栅布喇格中心波长随溶液浓度的变化量可以由数值计算得出, 通过光谱仪或其它解调装置监测布喇格波长的变化可间接地测量溶液浓度.

\*北京市教委科技发展计划 (200411232005)、国家自然科学基金项目 (60677003) 和现代通信系统中新型探测技术与接受模块的研究 (XK100130637) 资助

Tel: 010-62283520 Email: mzhaofoang@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-12-11

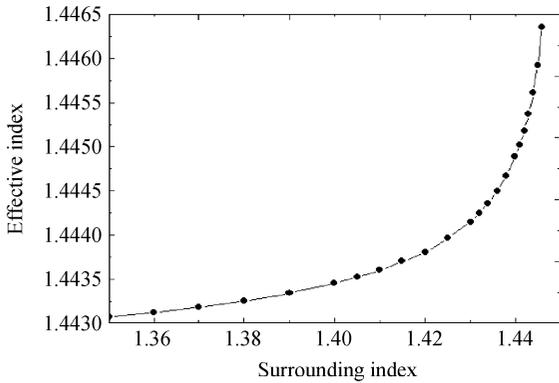


图1 光纤布喇格光栅纤芯有效折射率随外界折射率变化的曲线

Fig. 1 The relation between effective index and surrounding index

## 2 温度对传感器影响

光纤光栅用做化学折射率传感器时,温度变化不可避免地会对整个传感过程产生影响,会引起光纤光栅布喇格波长的漂移,造成不可忽略的误差.从物理本质上看,温度变化会同时影响光纤光栅和待测量溶液.

### 2.1 温度对光纤光栅的影响

从光栅布喇格方程(1)出发,两边微分可以得到温度变化  $\Delta T$  导致光纤光栅的相对波长移动

$$\Delta\lambda_B = 2\left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}\Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a}\Delta a\right]\Lambda + 2n_{\text{eff}}\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\Delta T \quad (3)$$

式中  $\alpha_n = (1/n_{\text{eff}})(\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$  代表光纤光栅的热光系数;  $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$  代表热膨胀引起的弹光效应;  $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$  代表由于热膨胀导致光纤芯径变化而产生的波导效应;  $\alpha_\Lambda = (1/\Lambda)(\partial \Lambda/\partial T)$  代表光纤的线性热膨胀系数. 由热膨胀引起的弹光效应以及热膨胀带来的光纤纤芯变化,从数值上要比光纤热光效应和光纤热膨胀效应要小几个数量级,这样在实际计算或估算时可以忽略这些细微的变化,而只保留主要的影响. 这样,式(3)则可以改写为

$$\Delta\lambda_B = (\alpha_n + \alpha_\Lambda)\lambda_B\Delta T \quad (4)$$

对于石英光纤,其热光系数和线性热膨胀系数都是常量,其值分别为  $\alpha_n = 6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_\Lambda = 5.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . 当光纤光栅工作波长为 1 550 nm 时,温度每变化  $1^\circ\text{C}$ ,将导致 11.4 pm 的波长漂移.

### 2.2 温度对溶液折射率的影响

折射率是溶液的重要物理参量,它受到温度、压力等因素的影响. 溶液折射率随温度的升高而减小,且不同溶液在温度变化量相同时,其折射率变化量是不同的,这是因为不同液体的热膨胀系数不相同. 溶液折射率随温度的变化可表示为

$$n_L^t = n_L^{20} - \alpha(t - 20^\circ\text{C}) \quad (5)$$

$n_L^{20}$  是温度为  $20^\circ\text{C}$  时溶液的折射率,  $\alpha$  是溶液折射率随温度变化的系数.

温度对溶液折射率的影响会造成传感过程中布喇格波长的漂移,若化学溶液的浓度灵敏度定义为浓度变化 1% 引起的波长移动,则可以得出温度影响溶液折射率造成的波长漂移量和灵敏度的关系

$$\Delta\lambda_B = \alpha\beta\Delta T/\gamma \quad (6)$$

式中  $\alpha$  是溶液折射率随温度变化的系数,  $\beta$  是化学溶液的灵敏度,  $\gamma$  是浓度变化 1% 引起的折射率变化,同一种溶液,  $\gamma$  的值为常量.

## 3 温度补偿

由分析可知,温度变化会引起溶液折射率的改变和光纤光栅的变化. 它们又影响光纤光栅布喇格波长的漂移,温度升高导致溶液折射率的改变引起波长漂移的方向与导致光纤光栅变化引起波长漂移的方向正好相反. 这样会抵消掉一部分由于温度影响光纤光栅引入的波长正漂移,见表 1. 当溶液的浓

表 1 温度变化引起的波长漂移表(丙二醇)

溶液浓度	折射率温度系数 $\alpha(10^{-4})$	化学灵敏度/ $(\text{pm}/1\%)$	温度影响溶液引入的波长漂移量 $(\text{pm}/^\circ\text{C})$	温度影响 FBG 引入的波长漂移量 $(\text{pm}/^\circ\text{C})$	温度引入的总波长漂移量 $(\text{pm}/^\circ\text{C})$
10%	1.633	12.7	-2.0	11.4	9.4
20%	1.896	15.0	-2.8	11.4	8.6
30%	2.159	17.5	-3.7	11.4	7.7
40%	2.422	20.2	-4.8	11.4	6.6
50%	2.685	25.2	-6.6	11.4	4.8
60%	2.948	31.2	-9.1	11.4	2.3
70%	3.211	40.1	-12.6	11.4	-1.2
80%	3.474	53.6	-18.2	11.4	-6.8
90%	3.737	78.3	-28.6	11.4	-17.2

度较低时( $<50\%$ ),温度影响溶液折射率造成的波长漂移较小,温度对传感的影响主要是温度影响光纤光栅引入的波长漂移,这就需要对传感系统进行温度补偿,降低传感系统对温度的敏感性<sup>[10-11]</sup>. 当溶液浓度在  $60\% \sim 70\%$  之间时,温度引起的正负波长漂移量相差不大,温度造成的总波长漂移较小,可以忽略,不需要进行温度补偿. 当溶液浓度较高时( $>70\%$ ),温度影响溶液折射率造成的波长漂移较大,在测量过程中造成的误差又不能消除,只能在测量结果中,加入修正项来消除,修正项包括由温度造成的正负波长漂移

$$\lambda_B = \lambda_m + \Delta\lambda_B = \lambda_m + (\alpha\beta/\gamma - 11.4)\Delta T \quad (7)$$

式中  $\lambda_B$  为不受温度影响的光栅布喇格波长,  $\lambda_m$  为测量得到的光栅布喇格波长.

为了消除温度对这种化学传感器的影响,本文设计了温度补偿方案,选用了特殊的光纤光栅的结构.本方案采取半光栅蚀刻法,即:将光纤光栅区的一半采用氢氟酸进行腐蚀,另一半则不作任何处理,如图 2.经腐蚀处理过的光栅区对溶液折射率的变化敏感,用作传感头来测量化学溶液的浓度;未经处理的光栅区则对溶液折射率的变化不敏感,但对温度变化敏感,用来测量温度变化.

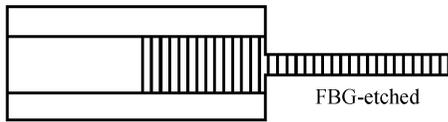


图 2 半光栅蚀刻方案

Fig. 2 The scheme of half-FBG etched

当被测溶液的浓度较低时,温度影响溶液折射率造成的波长漂移较小,温度对传感器的影响主要是温度对光栅影响造成的波长漂移.温度对光栅的影响并不因光栅截面的大小不同而不同,两段栅区受温度影响产生的波长漂移量相同,通过取两段栅区的波长漂移差值可消除温度变化对光纤光栅引入的波长漂移,但不能消除由温度对溶液折射率影响造成的波长漂移.这种补偿方式不需测量温度的变化,对任何可测量的溶液都适用.

当溶液浓度较高时,温度影响溶液折射率引入的波长漂移较大,未经腐蚀的光栅区对折射率变化不敏感,不能利用两段栅区的波长漂移差值来消除,只能在测量结果中,加入修正项式(7)来消除.利用未经腐蚀的光栅区测量温度的变化,代入修正项可以消除温度对传感器的影响.这种补偿方式可将温度对传感器的影响完全消除,但不同的被测溶液,修正项中的系数不同,在测量时需要首先确定溶液修正项的系数.

## 4 实验验证

实验中采用工作波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器和相位掩模版在光敏光纤中写入布喇格光栅,获得布喇格光栅的反射率为 99.6%,波长为 1 552.04 nm.利用氢氟酸腐蚀光纤布喇格光栅减小包层的直径,首先采用 45% 氢氟酸溶液对部分光栅区进行腐蚀,大约 40 min 后,光栅区的直径减小到 20  $\mu\text{m}$  以下,然后改用 15% 的氢氟酸进行腐蚀,直至光栅区的直径降低到约为 6  $\mu\text{m}$ ,得到本方案中的光栅传感头,通过 EDFA、光环行器和光谱仪进行测量.

首先研究两段光栅区低浓度溶液中受温度的影

响,将光栅放入纯净水中,同时监测反射谱随温度的变化.随着温度增加,两段光栅区的布喇格波长都向长波长方向漂移,但是两段光栅区的波长差值不会改变.温度变化由 20  $^{\circ}\text{C}$  到 95  $^{\circ}\text{C}$ ,两段光栅区布喇格波长的漂移见图 3.可以看出传感头不同光栅区的布喇格波长受到温度变化的影响基本相同,通过测量波长的差值可消除温度的影响.

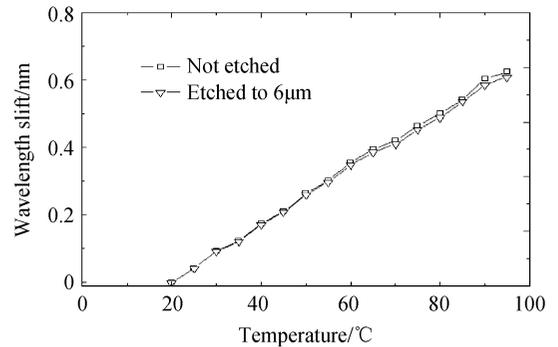


图 3 半腐蚀光栅两光栅区的布喇格波长随温度的变化

Fig. 3 Wavelength shift of the etched half versus temperature for two FBGs

其次研究两段光栅区在高浓度溶液中受温度的影响,将传感头放入浓度为 80% 的丙二醇溶液中,同时监测反射谱随温度的变化.随着温度增加,未被腐蚀光栅区的布喇格波长向长波长方向漂移,而被腐蚀光栅区的布喇格波长向短波长方向移动.温度变化由 20  $^{\circ}\text{C}$  到 95  $^{\circ}\text{C}$ ,两段光栅区布喇格波长的漂移见图 4.在高浓度溶液中,被腐蚀光栅区受温度影响溶液折射率变化造成的波长漂移超过了受温度影响光纤光栅造成的漂移,此时传感头受温度影响造成的总波长漂移量可由修正项得出.由实验测量得出的数据可以得出传感头受温度影响造成的总波长漂移量约为未被腐蚀光栅区的波长漂移量的 0.6 (见图 4),与理论结果基本一致.因此,测量高浓度溶液时,传感头受温度影响造成的总波长漂移量可

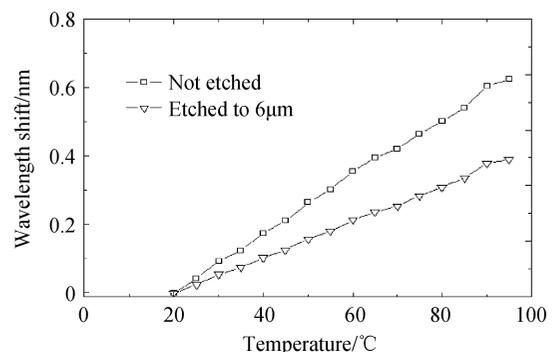


图 4 高浓度丙二醇溶液下半腐蚀光栅两光栅区的布喇格波长随温度的变化

Fig. 4 Wavelength shift of the etched half versus temperature for two FBGs in high concentration of propylene glycol solution

由未被腐蚀光栅区波长漂移的大小带入修正项得出,从而消除温度对溶液传感的影响.由实验测量可知,在高温下,传感头两段光栅区的波长差值变化不大(见图3),此温度补偿方案在高温下也同样适用.

## 5 结论

本文从理论上阐述基于光纤光栅的化学传感器的基本原理,利用数值计算得出了光栅布喇格中心波长随外界环境折射率变化的关系,进而可得出光栅布喇格波长随溶液浓度变化的关系.最后从温度对光栅本身和对溶液折射率的影响出发,分析了温度在传感过程中,造成布喇格种波长的漂移对传感准确度的影响.提出了一种温度补偿方案,并通过实验测量对此方案进行验证,实验结果证明了此方案切实可行.该传感器可以用于液体环境中化学或生物成分的变化,并可以实现多点同时监测,在医疗、制药、环境监测等有良好的应用前景.

### 参考文献

- [1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Lightwave Technol*, 1997, **15**(8): 1442-1463.
- [2] SHU X, CHISHOLM K, FELMERI L, *et al.* Highly sensitive transverse loading sensing with reversible sampled fiber Bragg gratings[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**(15): 3003-3005.
- [3] ZHANG Xiang-dong, LI Yu-lin, PENG Wen-da, *et al.* Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on FBG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1166-1169.  
张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1166-1169.
- [4] CUI Chun-lei, LIU Wei-ping, HUANG Hong-bin, *et al.* Cladding mode's characteristic and its affects on transmission spectrum of long period fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1569-1572.  
崔春雷, 刘伟平, 黄红斌, 等. 长周期光纤光栅包层模特性及其对传输谱的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1569-1572.
- [5] LIAO Yi, RAO Yun-jiang, HU Yong-ming, *et al.* A low-cost long-period fiber grating-based sensor device [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 702-705.  
廖毅, 饶云江, 胡永明, 等. 低成本长周期光纤光栅传感系统[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 702-705.
- [6] LIANG W, HUANG Y, XU Y, *et al.* Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(15): 151122.
- [7] CHRYSSIS A N, LEE S M, LEE S B. High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(6): 1253-1255.
- [8] SANG Xin-zhu, YU Chong-xiu, YAN Bin-bin, *et al.* Chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 771-774.  
桑新柱, 余重秀, 颜玢玢, 等. 基于光纤布喇格光栅的化学传感器[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 771-774.
- [9] YARIV A. Optical electronics in modern communications[M]. 5th ed Oxford: Oxford University Press, 1997: 80-88.
- [10] SANG X Z, YU Chong-xiu, MAYTEEVARUNYOO T, *et al.* Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, **120**(2): 754-757.
- [11] SANG Xin-zhu, YU Chong-xiu, YAN Bin-bin, *et al.* Temperature-insensitive chemical sensor with twin Bragg gratings in an optical fiber[J]. *China Phys Lett*, 2006, **23**(12): 3202-3204.

## Influence of Temperature on Performance of Fiber Bragg Grating Based on Chemical Sensor

MENG Zhao-fang, YAN Bin-bin, SANG Xin-zhu, YU Chong-xiu, WANG Kui-ru, XU Da-xiong

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of Ministry of Education,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Received date: 2007-12-11

**Abstract:** The chemical sensing principle based on Fiber Bragg Grating (FBG) was presented. The relation between effective core index and surrounding index of etched FBG was derived and obtained by numerical calculation. The error of sensing affected by temperature was discussed. The results show that the sensor sensitivity is affected by temperature through both the FBGs and the refractive index of chemical solutions change. A scheme of temperature-insensitive chemical sensor based on FBGs was designed. Wavelength shift of sensor versus temperature for two FBGs in low and high concentration of propylene glycol solution is experimentally investigated. The result indicates that, two wavelength shifts of the sensor in purified water exhibit almost the same thermal effects, so that the thermal effect can be eliminated by measuring the wavelength difference. The ratio between entire wavelength shift with thermal effect and wavelength shift of grating not etched is 0.6, which is basically the same as theoretical result. The entire wavelength shift with thermal effect can be reduced by wavelength shift of grating not etched, eliminating the thermal effect in solution sensing.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Chemical sensor; Refractive index; Temperature-insensitive



**MENG Zhao-fang** was born in 1984 and received the B. S degree from School of Electronic - Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications. Now he is a graduate student for the M. S. degree at Beijing University of Posts and Telecommunications, and research interests focus on the optical fiber sensors and nonlinear optics.