

文章编号 1004-924X(2006)05-0771-04

基于光纤布拉格光栅的化学传感器

桑新柱¹, 余重秀¹, 颜纷纷¹, T. Mayteevarunyoo², 吕乃光³, 张琦¹

(1. 北京邮电大学 电子工程学院 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876;

2. 马哈那空科技大学 通信工程系, 曼谷 10530 泰国;

3. 北京机械工业学院 电子信息工程系, 北京 100085)

摘要: 除掉光纤布拉格光栅的包层, 可以使它的布拉格波长对外界环境的折射率变化敏感。采用氢氟酸腐蚀掉光纤布拉格光栅的包层, 获得了直径约为 $6\ \mu\text{m}$ 的布拉格光栅。实验研究了布拉格波长对化学溶液的浓度敏感性特征, 结果表明: 采用 $10\ \text{pm}$ 分辨率的光谱仪, 丙二醇溶液在低浓度时的浓度分辨率为 0.7% , 在高浓度时的分辨率为 0.32% ; 糖溶液在低浓度时的分辨率为 0.55% , 高浓度时为 0.1% 。采用商用的分辨率为 $1\ \text{pm}$ 的高精度波长解调系统, 它们的分辨率可以提高一个数量级。

关键词: 光纤布拉格光栅; 化学传感器; 生物传感器; 折射率

中图分类号: TP212.2; TN253 **文献标识码:** A

Chemical sensor based on a fiber Bragg grating

SANG Xin-zhu¹, YU Chong-xiu¹, YAN Bin-bin¹, T. Mayteevarunyoo², LÜ Nai-guang³, ZHANG Qi¹

(1. *Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of Ministry of Education, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*; 2. *Department of Telecommunication Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand*; 3. *Department of Electronic Information Engineering, Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085, China*)

Abstract: Bragg wavelength sensitivity to the refractive index of the ambient media can be realized by etching out the cladding of fiber Bragg grating. A fiber Bragg grating with the diameter of $6\ \mu\text{m}$ is obtained through hydrofluoric (HF) acid etching. Bragg wavelength sensitivity to chemical solutions is experimentally investigated. With an optical spectrum analyzer to detect the wavelength shift, the concentration resolutions of propylene glycol solutions are 0.7% and 0.32% at low and high concentrations, respectively. For sugar solutions, concentration resolutions are 0.55% and 0.1% respectively. In addition, the concentration resolutions can be improved an order of magnitude with wavelength interrogation module of $1\ \text{pm}$ resolution.

Key words: fiber Bragg grating; chemical sensor; biosensor; refractive index

收稿日期: 2006-03-21; 修订日期: 2006-07-18.

基金项目: 北京市教委科技发展计划 (No. 200411232005); 北京市机电系统测控重点实验室开放项目、电子工程学院博士启动基金项目资助。

1 引言

在工业生产、工程建设、医疗和生态保护过程中,需要检测许多物理和化学参数,因此需要大量的传感系统。与传统的传感器相比,光传感器有突出的优点,如对电磁场不敏感,高敏感性和响应快速等。近十多年来,光纤光栅的制造技术获得巨大进步^[1-4]并广泛应用于温度、应力、载荷和弯曲度等物理参数的测量^[5-7]。其中基于光纤布拉格光栅的传感器引起人们广泛的注意,高敏感性、复用能力和低成本等是它的显著优点。在化学和生物的传感应用中,折射率传感器占有重要的地位,它通过测量折射率的变化来确定物质的化学成分和含量^[8-10],但是光纤布拉格光栅在化学传感器方面并未得到充分研究和应用。长周期光纤光栅具有对外折射率变化十分敏感的特性^[11-12],但是它的多峰值、带宽大和只能采用传输谱探测的工作方式限制了它的测量精度和复用能力。在一般的光纤布拉格光栅中,只产生芯模和芯模之间的耦合,由于包层的存在,它的谐振波长对外折射率的变化不敏感。然而如果除去包层,光纤布拉格光栅的有效折射率就会受外折射率的影响^[13],光栅的布拉格波长会产生移动。近来,有人提出了采用氢氟酸腐蚀标准和 D 形光纤布拉格光栅包层实现对外界环境折射率的传感^[14-15],本文采用氢氟酸腐蚀掉光敏光纤中制造的布拉格光栅的包层,实验研究在两种化学溶液中的浓度敏感性特征。

2 基本原理

对于光纤布拉格光栅,反射谱的中心波长由下式给出

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

式中 Λ 是布拉格光栅的周期, n_{eff} 是芯模的有效折射率。在光纤布拉格光栅传感器中,通常通过监测布拉格波长的移动来判断被测量的变化。在一般的温度和应力传感器中,波长的变化主要是由光栅周期 Λ 的变化引起的。这里研究的光纤布拉格光栅化学传感器,是由于在腐蚀掉包层后,光栅只是波导结构的弱微扰。化学溶液的浓度的变化,使溶液的折射率发生变化,在倏逝波的作用

下,光纤的有效折射率与溶液的折射率存在一定的依赖关系^[13]。由方程(1)给出的布拉格波长和有效折射率的关系,可以利用布拉格波长的移动量反映化学溶液浓度的变化,从而实现对化学溶液浓度的传感。

3 实验和实验结果

实验中采用工作波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器和周期为 1 072 nm 的相位掩模板在光敏光纤中写入布拉格光栅,光栅的形成过程通过光谱仪实时监测。实验获得布拉格光栅的反射率为 98%,波长为 1551.65 nm。与文献中的处理方法相似^[14-15],为加速处理过程,首先采用 45% 氢氟酸溶液对光栅区进行腐蚀,大约 40 min 后,光栅区的直径减小到 20 μm 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 μm ,最后对它进行清洗。通过 EDFA 自发辐射产生的宽带光、光环形器和光谱仪,实验测得布拉格光栅腐蚀前和腐蚀后放入纯净水中的反射谱如图 1 所示。

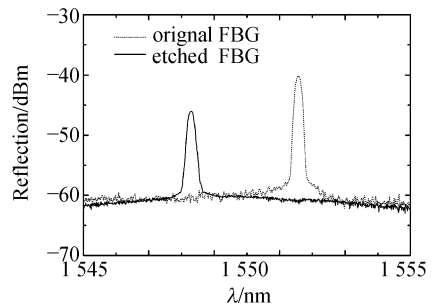


图 1 光纤布拉格光栅腐蚀前后的反射谱

Fig. 1 Reflection spectra of fiber Bragg grating before and after etching

要研究的化学传感器的传感机理是基于布拉格波长对环境折射率的响应。首先采用折射率计测量标定两种化学溶液丙二醇和糖溶液的浓度与折射率之间的关系,获得的结果如图 2 所示。丙二醇溶液的浓度从 0% 变化到 100%,折射率近似线性地从 1.33 增加到 1.432;糖溶液的浓度从 0% 变化到 65%,折射率近似线性地从 1.33 增加到 1.453。

将光纤布拉格光栅的传感头放入到浓度不同的丙二醇和糖溶液中,通过光谱仪观察光栅的反

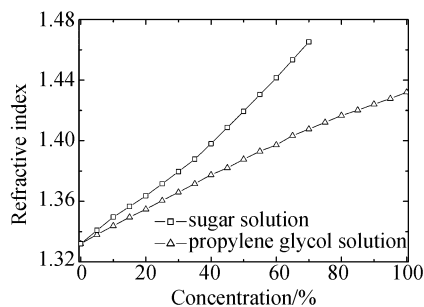
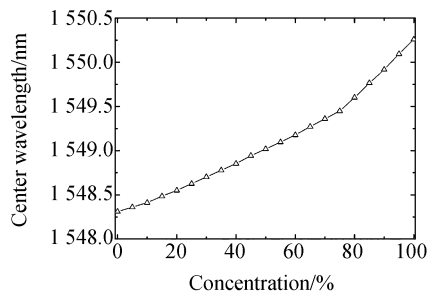


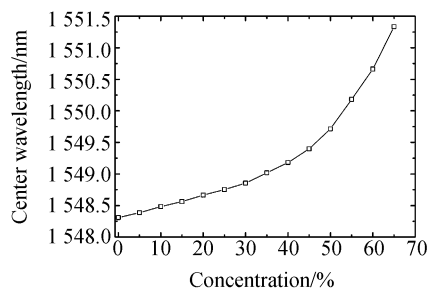
图 2 丙二醇和糖溶液折射率与浓度之间的关系

Fig. 2 Refractive index against concentration of propylene glycol and sugar solutions



(a) 丙二醇

(a) propylene glycol



(b) 糖

(b) sugar

图 3 光纤布拉格光栅的中心波长化学溶液浓度的变化

Fig. 3 Center wavelength shift of fiber Bragg grating against concentration of chemical solutions

射谱的变化,测量所得的结果如图 3(a)和(b)所示。从图中可以清楚看出,随着溶液浓度的增加,反射谱的中心波长以不同的增长率向长波长方向移动。中心波长对糖溶液浓度的敏感性大于对丙二醇溶液的敏感性,这是因为糖溶液的折射率随浓度的变化大于丙二醇溶液折射率随浓度的变化。

如果将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,则在低浓度时丙二醇和糖的灵敏度分别为 14 pm/%和 20 pm/%;在高浓度时丙二醇和糖的灵敏度分别为 32 pm/%和 98 pm/%。实验采用分辨率为 10 pm 的光谱仪进行,此时传感器对丙二醇溶液在低浓度时的浓度分辨率为 0.7%,在高浓度时的分辨率为 0.32%;糖溶液在低浓度时的分辨率为 0.55%,高浓度时为 0.1%。对于光纤布拉格光栅的波长解调,已经有几种商用分辨率为 1pm 的波长解调模块^[16]。这样对于实用的传感系统,测量化学溶液浓度的分辨率可以比采用光谱仪提高一个数量级。

4 结 论

采用实验室制作的光纤布拉格光栅,利用氢氟酸腐蚀掉包层的方法,实现了测量化学溶液浓度的化学传感器。实验结果表明:采用光谱仪进行波长识别时,传感器对丙二醇溶液在低浓度时的浓度分辨率为 0.7%,在高浓度时的分辨率为 0.32%;糖溶液在低浓度时的分辨率为 0.55%,高浓度时为 0.1%。如果采用商用的分辨率为 1 pm 光纤布拉格光栅波长解调模块,分辨率可以提高一个数量级。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、石化工业生产和饮食行业等有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fiber by transverse holographic method[J]. *Opt. Lett.*, 1989, 14(15):823-825.
- [2] HILL K O, MALO B, BILODEAU F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(10):1235-1237.

- [3] SANG X Z, CHU P L, YU C X, *et al.* Novel growth phenomena in fiber Braggs under low irradiation power[J]. *Opt. Commun.*, 251(1-3):94-99.
- [4] 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):633-636.
SANG X Z, YU C X, WANG K R, *et al.* Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6):633-636. (in Chinese)
- [5] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating Sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(8):1442-1463.
- [6] 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.
- [7] 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1): 79-83.
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg sensing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 79-83. (in Chinese)
- [8] ZHANG Y, ZHANG B, LIAO Y. Experimental research and analysis of salinity measurement based on optical techniques[J]. *Sen. Actuators B:Chem*, 2003, 92(3) :331-336.
- [9] CHAN S, FAUCHET P M, LI Y, *et al.* Porous silicon microcavities for biosensing applications[J]. *Phys. Stat. Sol.*, 2000, 182(4):541-546.
- [10] OZBAY G, RILEY J G. An analysis of refractometry as a method of determining blood total protein concentration in americal lobster homarus americanus[J]. *Aquaculture Research*, 2002, 33(5):557-562.
- [11] CHIANG K S, LIU Y, NG M N, *et al.* Analysis of etched long-period fiber grating and its response to external refractive index[J]. *Electron. Lett.*, 2000, 16(11):966-967.
- [12] SHU X, ZHANG X L, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, 20(2):255-266.
- [13] YARIV A. *Optical electronics in moder communications*[M]. 5th ed., Oxford: Oxford University Press, 1997, 80-88.
- [14] LIANG W, HUANG Y, XU Y, *et al.* Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86:1551122-1-3.
- [15] ZHOU K, CHEN X, ZHANG L, *et al.* High-sensitivity optical chemsensor based on etched D-fibre Bragg gratings [J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(4):232-233.
- [16] MEASURES R M. *Structural monitoring with fiber optical technology*[M]. London: Academic Press, 2001.

作者简介: 桑新柱(1977—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事新型光电子器件、光纤通信和光量子信息处理等方面的研究, 已在国际和国内期刊上发表论文 20 余篇。E-mail: xzsang@126.com