

文章编号: 0258-7025(2009)08-2042-04

# 基于非对称折变型超长周期光纤光栅的湿度传感器

宋 韵<sup>1</sup> 朱 涛<sup>1,2</sup> 饶云江<sup>1,2</sup> 赵英伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044  
<sup>2</sup> 成都电子科技大学宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 利用高频 CO<sub>2</sub> 激光在普通通信单模光纤上制作了非对称折变型超长周期光纤光栅(ULPFG), 由于这种光栅具有较高的外界折射率响应灵敏度, 可基于此设计制作高灵敏度湿度传感器。通过在 ULPFG 的表层涂覆一层具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶, 水凝胶通过吸收空气中的水蒸气而使自身的折射率发生变化, 从而导致 ULPFG 透射谱的谐振峰发生漂移, 通过检测 ULPFG 谐振峰的漂移量就实现了对环境湿度参量的传感。实验结果表明, 在 38%~96% 的相对湿度变化范围内, 光栅谐振峰的最大漂移量可达约 30 nm, 比先前一些报道的湿度传感器的灵敏度高出近 3 倍。

**关键词** 传感器; 超长周期光纤光栅; 水凝胶; 湿度

中图分类号 O436; TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2042

## A Humidity Sensor Based on Ultra-Long-Period Fiber Gratings with Asymmetric Refractive Index Modulation

Song Yun<sup>1</sup> Zhu Tao<sup>1,2</sup> Rao Yunjiang<sup>1,2</sup> Zhao Yingwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

<sup>2</sup> Key Laboratory Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies, Ministry of Education, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** An ultra-long-period fiber grating (ULPFG) with asymmetric refractive index modulation is fabricated in common communication optical fiber by using high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses. A highly sensitive humidity sensor based on this grating can be realized due to its high refractive index sensitivity. The ULPFG is coated with a new nano-composite hydrogel, which has strong water capacity. This kind of hydrogel can absorb water vapor in the air substantially to make its own refractive index change, which will induce the resonant peak shift of transmission spectrum of the ULPFG. And such a shift can be used in humidity measurement. The experimental results show that the maximum shift of the resonant peak can reach 30 nm when the surrounding humidity varies in the range of 38%~96%, and such sensitivity is three times higher than that of the humidity sensors reported before. Such novel humidity sensor can be found important applications in humidity measurement of the field of optical fiber sensing.

**Key words** sensors; ultra-long-period fiber grating; hydrogel; humidity

### 1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)是一种新型光纤无源器件<sup>[1]</sup>, 它的光栅周期可达几百个微米, 满足相位匹

配条件的是同向传输的纤芯基模和包层模, 这将导致长周期光纤光栅的谐振波长的各个参量对外界环境的变化非常敏感, 因此它具有比光纤布拉格光栅

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(60807019, 60537040)、重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)、重庆大学骨干教师创新基金和重庆大学研究生创新基金资助课题。

作者简介: 宋 韵(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。E-mail: fiber@cqu.edu.cn

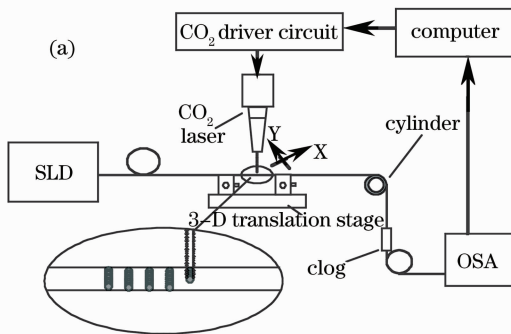
导师简介: 饶云江(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu.edu.cn (通信联系人, 中国光学学会会员; 4009074)

更好的温度、应变、弯曲、扭曲、横向负载、浓度和折射率灵敏度<sup>[2~5]</sup>,在光纤传感领域具有极大的应用潜力。特别是基于对环境折射率的测量来实现生化传感成为近年来的研究热点<sup>[6~9]</sup>。其中,环境湿度的测量在许多领域都具有重要的意义。例如在许多仓库、博物馆、图书馆、计算机中心和一定的工厂(比如微电子工业)都需要使用湿度计随时监测空气湿度的变化。但传统的湿度计对电磁干扰的抵抗能力较差,而且不能应用于环境较恶劣的条件下测量。目前,关于使用光纤光栅进行湿度测量的报道不多。Luo 等<sup>[10]</sup>提出在光栅外表面涂覆容易与湿度发生反应而改变折射率的特殊塑料可实现对环境相对湿度的实时测量,Wang 等<sup>[11]</sup>提出在长周期光纤光栅的表层涂覆了一种水凝胶来实现对环境湿度的测量,但是他们的测量灵敏度较低。在本课题组先前研究的基础上,本文利用超长周期光纤光栅(ULPFG)折射率变化对外界环境敏感的特性,在其表层涂覆一层具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶,通过测量水凝胶吸水后折射率的变化来传感周围环境湿度的变化。这种光学形式的湿度计不仅可以有效解决传统湿度计的缺陷,并且具有较大的测量灵敏度,对生产生活有一定的指导意义。

## 2 传感器的制作与理论分析

利用高频 CO<sub>2</sub> 激光制作 ULPFG 的实验装置如图 1(a)所示,装置主要由一个三维微动台和一个由计算机控制的高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲扫描系统组成,



制作的方法步骤与长周期光纤光栅相同<sup>[2]</sup>。图中 SLD 为超辐射发光二极管,OSA 为光谱分析仪。实验在康宁 SMF-28 普通通信单模光纤上制作了周期  $\Lambda=2\text{ mm}$ ,周期数  $N=15$  的 ULPFG,其传输谱如图 1(b)所示。在光栅表层涂覆了一层具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶。这种水凝胶是将丙烯酸酰胺、经焦磷酸钠改性的锂皂石(俗称“粘土”)、过硫酸钾以及硫代硫酸钠按一定的比例完全溶解在去离子水中形成预聚液,再向预聚液中鼓入氮气 30 min,去除溶液中残留的氧气,然后将溶液置于 40 °C 的恒温箱中保温 5 天,最后得到纳米水凝胶。通过实验发现,水凝胶的形成过程是一个从液态→黏糊态→白色胶状的过程,并且在黏糊态时与光纤具有较好的亲和性,所以选择在水凝胶黏糊态的时候将其涂覆到光栅表层。如图 4 所示,当水凝胶预聚液在恒温箱保存 1~2 天呈现黏糊态时,将 ULPFG 保持绷直状态固定在恒温箱内,并与宽带光源和光谱仪相连接,以便对光栅光谱的变化进行实时监测。用玻璃棒将水凝胶均匀地涂抹在光栅表面,同时在光谱仪上观察谱线的变化。由于水凝胶的折射率大于包层的折射率,所以当水凝胶涂覆到光栅表层后,光栅的透射谱线会发生变化,谐振峰幅值会减小。最后将涂覆后的光栅继续在恒温箱中保温到纳米水凝胶完全形成。涂覆后的光栅及其透射谱分别如图 2 和图 1(b)所示。

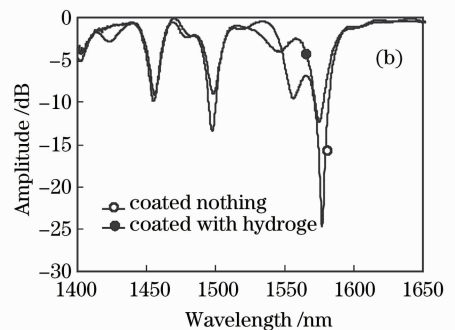


图 1 (a) 利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲制作 ULPFG 的装置示意图;(b) ULPFG 涂覆水凝胶前后的传输谱比较

Fig. 1 (a) Fabrication set-up of ULPFG by using high frequency CO<sub>2</sub> laser pulses;

(b) compare of transmission spectra between the ULPFG coated with hydrogel and nothing

ULPFG 涂覆水凝胶后的横截面波导结构如图 3 所示,光纤纤芯和包层的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ,涂覆的水凝胶薄膜的折射率为  $n_3$ ,外界环境的折射率为  $n_4$ ,其中  $n_3 > n_2$ 。用有效折射率来表示 ULPFG 的相位匹配条件为<sup>[3]</sup>

$$\lambda_{\text{res}}^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})\Lambda/N \quad (N \geq 1), \quad (1)$$

其中  $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$  为光栅谐振峰波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  与  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  分别表示纤芯基模及  $N$  阶闪耀模  $m$  次包层模的有效折射率, $\Lambda$  为光栅周期, $N$  表示闪耀模阶数。由公式(1)可知,当光栅周期  $\Lambda$  一定时,光栅的谐振峰波长  $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$  取决

于  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ , 而  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  的大小与  $n_1$  和  $n_2$  的值有关,  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  的大小又与  $n_2, n_3$  和  $n_4$  的值有关。用传播常数来表示  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  为

$$n_{\text{eff}}^{\text{co}} = \frac{\beta^{\text{co}} \lambda_{\text{res}}^{N,m}}{2\pi}, \quad (2)$$

$$n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m} = \frac{\beta^{\text{cl}} \lambda_{\text{res}}^{N,m}}{2\pi}, \quad (3)$$

其中  $\beta^{\text{co}}$  和  $\beta^{\text{cl}}$  分别表示纤芯基模和包层模的传播常数, 它们可以通过模式特征方程求得<sup>[12]</sup>。根据清华大学研究人员的计算结果<sup>[11]</sup>可知, 光栅的谐振峰波长与光纤表层所镀薄膜的折射率大小呈反比, 即当薄膜的折射率增大时, 谐振峰波长将随之减小, 反之成立。而本文所采用的这种具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶, 其内部有很多空穴, 在没有吸收水蒸气之前这些空穴内主要是空气, 而吸收水蒸气之后空穴内部的空气就被水蒸气所取代。而水的折射率( $n=1.33$ )要比空气的折射率( $n=1$ )大, 所以可以近似认为吸水后水凝胶的折射率变大了。因此, 从理论上讲, 当外界空气中的湿度增大时, 水凝胶薄膜吸水后折射率增大, 从而使得光栅谐振峰向短波方向漂移。

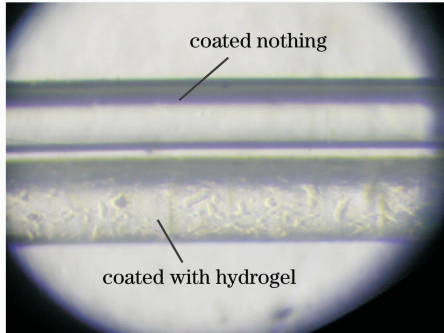


图2 涂覆水凝胶前后的 ULPGF

Fig. 2 Photograph of the ULPGF coated with hydrogel and nothing

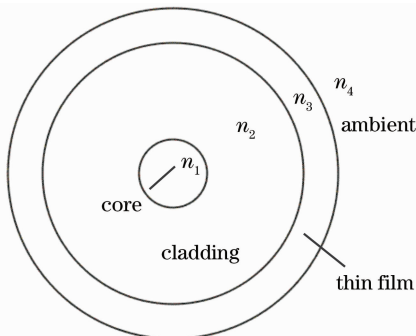


图3 涂覆水凝胶后 ULPGF 的波导结构

Fig. 3 Waveguide model of the ULPGF coated with hydrogel

### 3 湿度实验及讨论

将涂覆好水凝胶的 ULPGF 两端固定绷直置于一个温度和湿度都可调的恒温箱内, 并且始终保持 ULPGF 处于绷直状态, 实验装置如图 4 所示。在整个湿度实验中, 恒温箱内的温度一直保持在 25 °C, 湿度调节范围为 38%~96%。当相对湿度每变化 5%, 并且相对稳定后(保证光纤表面的水凝胶可以充分吸收恒温箱中的水蒸气, 引起自身折射率的变化), 就用光谱仪记录一次光纤光栅透射谱的数据。其中, 对湿度变化最敏感的谐振峰的湿度实验结果如图 5 所示。由图可知, 当相对湿度从 38.3% 上升到 96.7% 时, 该谐振峰从 1483.4 nm 漂移到了 1455.8 nm, 总共向短波方向漂移了近 28 nm (与理论分析相符), 是以往所报道的湿度计漂移量 (11.3 nm)<sup>[11]</sup> 的近 3 倍。而在相同湿度变化范围的降湿过程中, 该谐振峰向长波方向漂移了近 31 nm, 并且升湿降湿特性曲线的重复性不是很好, 存在一定的滞回。

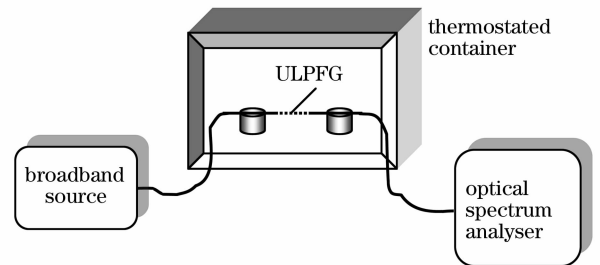


图4 湿度实验的装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up for the humidity measurement

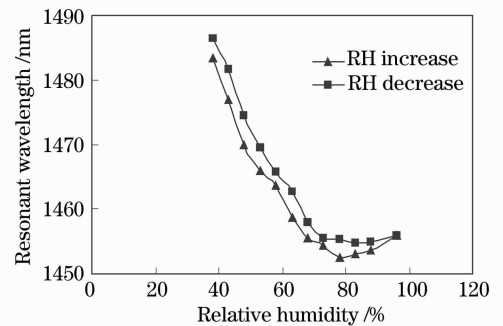


图5 谐振峰漂移与相对湿度的关系

Fig. 5 Relationship between the resonant wavelength shift and relative humidity

分析湿度计在升湿和降湿过程中重复性较差的原因可能有两点: 第一, 水凝胶吸水后会对光栅产生额外的横向力, 而在升湿实验后, 水凝胶吸水自身体积发生了变化, 使得在降湿实验时对光栅产生的附

加载荷发生了变化,这就导致了实验的重复性降低。而要解决这个问题,就需要加强水凝胶的稳定性。试想可以通过优化水凝胶各成分的配制比例,以及延长水凝胶形成过程中的保温时间,以便让各种成分充分反应,形成特性更加稳定的水凝胶。第二,水凝胶吸水后其溶胀流动性增强,导致水凝胶在光纤表面重新分布,这也势必会对湿度计的可重复性产生一定的影响。这个问题可以通过将光纤表面的水凝胶涂覆得尽可能薄的方法加以解决,这样也可以提高湿度计的灵敏度。

## 4 结 论

通过在 ULPGF 表面涂覆一层新型复合纳米水凝胶实现了一种高灵敏度的湿度传感器。实验结果表明,在 38.3%~96.7% 的湿度变化范围内,其谐振峰漂移量可达到约 28 nm,是以往报道的湿度计漂移量的近 3 倍。因此,高灵敏度使得这种湿度计在光纤传感领域的湿度测量中具有较大的应用潜力。然而其可重复性和稳定性的加强则是需要进一步研究解决的问题。

## 参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 2 Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003,

**21**: 1320~1327

- 3 T. Zhu, Y. J. Rao, Q. J. Mo. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a single ultra-long-period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2700~2702
- 4 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long-period fiber gratings induced by CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1730~1734  
王久玲, 饶云江, 朱 涛等. CO<sub>2</sub> 激光脉冲边缘写入的长周期光纤光栅折射率特性研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1730~1734
- 5 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 389~392  
王久玲, 饶云江, 朱 涛. 截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 389~392
- 6 S. Pilevar, M. P. Delisa, Z. Zhang *et al.*. Evanescent wave antibody-antigen biosensor based on long period fiber Bragg grating[C]. *The 14th OFS, Th 2-3*, 2000, 314~317
- 7 L. Rindorf, J. B. Jensen, M. Dufva *et al.*. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8224~8231
- 8 Zhengtian Gu, Yanping Xu, Kan Gao. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2405~2407
- 9 J. M. Corres, I. Villar, I. R. Matias *et al.*. Fiber-optic pH-sensors in long-period fiber gratings using electrostatic self-assembly[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 29~31
- 10 S. Luo, Y. Liu, A. Sucheta *et al.*. Applications of LPG fiber optical sensors for relative humidity and chemical warfare agents monitoring[C]. *SPIE*, 2002, **4920**: 193~204
- 11 Liwei Wang, Yang Liu, Min Zhang *et al.*. A relative humidity sensor using a hydrogel-coated long period grating [J]. *Measurement Science And Technology*, 2007, **18**: 3131~3134
- 12 C. Tao. *Optical Fiber Waveguide Analysis* [M]. New York: Oxford University Press, 1992