

# 基于波分复用的长周期光纤光栅光化学 多参量传感技术研究

陈海云<sup>1,2,3</sup> 顾铮先<sup>3</sup> 高 侃<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093  
<sup>2</sup> 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004  
<sup>3</sup> 上海理工大学学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093  
<sup>4</sup> 中国电子科技集团第二十三研究所, 上海 201900

**摘要** 提出一种基于波分复用(WDM)的长周期光纤光栅(LPFG)光化学多参量传感技术。利用均匀 LPFG 相邻级次包层模耦合谐振峰间的波长间隔,通过设计不同传感单元 LPFG 的光栅周期,进一步通过包层腐蚀或镀膜调整各 LPFG 特征峰位置,使各 LPFG 的特征峰在观察波长范围内相互错位。前一个 LPFG 激发的包层模不能传输到下一个 LPFG,不同参量变化引起的各 LPFG 特征峰移动相互独立,通过考察系统输出复合谱中各特征峰的偏移可得各参量值。实验中利用镀聚炳烯胺盐酸盐/聚丙烯酸(PAH/PAA)薄膜 LPFG、薄包层 LPFG 和镀 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 复合薄膜 LPFG 组成多参量传感系统,实现了对 pH 值、NaCl 溶液浓度和相对湿度(RH)三个参量的传感。基于 WDM 的 LPFG 光化学多参量传感原理与结构简单,各 LPFG 的结构设计可独立进行,适用于对多个光化学环境参量的分布式测量。

**关键词** 光纤光学;长周期光纤光栅;波分复用;多参量传感;敏感薄膜

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0205003

## Multi-Parameter Photochemical Sensing Technology of Long-Period Fiber Grating and Wavelength Division Multiplexing

Chen Haiyun<sup>1,2,3</sup> Gu Zhengtian<sup>3</sup> Gao Kan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for  
Science and Technology, Shanghai 200093, China

<sup>2</sup> Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

<sup>3</sup> Laboratory of Opto-Electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for Science and  
Technology, Shanghai 200093, China

<sup>4</sup> No. 23 Research Institute of China Electronic Technology Corporation Group, Shanghai 201900, China

**Abstract** A multi-parameter photochemical sensing technology of long-period fiber gratings (LPFGs) based on wavelength division multiplexing (WDM) is put forward. Utilizing the wide wavelength space between two resonance peaks corresponding to two neighboring cladding modes of a uniform LPFG, the characteristic peaks of respective sensing units in the multi-parameter sensing system are tuned to distribute in the wavelength space discretely by designing grating periods of different sensor units of LPFG, eroding cladding or depositing films on cladding. There is no cladding modes interference between LPFGs and the peak shifts induced by the variations of corresponding parameters are independent, and finally the respective parameters are obtained by directly interrogating the corresponding characteristic peaks. In the experiment, a multi-parameter photochemical sensing system consisting of

收稿日期: 2013-07-22; 收到修改稿日期: 2013-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(60777035)、教育部科学技术研究重点项目(208040)、上海市教育委员会科研项目(11ZZ131)、上海市重点学科建设项目(S30502)

作者简介: 陈海云(1977—),男,讲师,博士研究生,主要从事光纤光栅传感理论与技术、光电检测等方面的研究。

E-mail: chy@zjnu.cn

导师简介: 顾铮先(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜、光纤传感器等方面的研究。

E-mail: zhengtian@163.com(通信联系人)

LPFG coated with polypropylene amine hydrochloride/polyacrylic acid (PAH/PAA) film, thin cladding LPFG and LPFG coated with  $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$  composite film is set up, which can perform the measurements of pH value, concentration of NaCl solution and relative humidity (RH), respectively. The sensing mechanism and system structure of this WDM-based LPFG multi-parameter photochemical sensing technology are simple and the design of respective sensing units can be carried out independently, which enables this technology to be applied in the distributed sensing of multiple environmental parameters.

**Key words** fiber optics; long-period fiber grating; wavelength division multiplexing; multi-parameter sensing; sensitive film

**OCIS codes** 060.2310; 060.2340; 060.2330

## 1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)能够将纤芯模耦合到同向传输的包层模,从而在透射谱中产生一系列离散的损耗峰。与光纤布拉格(Bragg)光栅相比,LPFG具有制作容易、插入损耗低、后向反射小、结构紧凑等优点,且包层模的模场分布易受到环境的影响,尤其适用于环境折射率(SRI)和溶液浓度<sup>[1-2]</sup>的传感。2002年,Rees等<sup>[3]</sup>提出了镀膜LPFG的结构模型,此后镀膜LPFG成为光纤光栅在光化学和光生物传感方面研究的热点。LPFG表面镀制薄膜对LPFG传感特性的影响主要体现在三个方面:1)扩大了LPFG折射率传感应用的范围,包层表面镀制高折射率(HRI)薄膜使被测介质折射率不再局限于小于包层折射率<sup>[3]</sup>;2)影响包层模模场分布,选取合适的薄膜参数可提高LPFG对SRI的响应灵敏度<sup>[4]</sup>;3)薄膜用作转换器,薄膜与被测介质相互作用引起薄膜参数变化,通过考察由此而导致的谱变化可实现对被测量的传感<sup>[5]</sup>。

多参量传感技术是光纤光栅传感领域的一个重要课题<sup>[6]</sup>,其中最基本的是利用单个光栅光谱中不同谐振峰对不同参量响应灵敏度的差异通过差分调制法实现对两个参量的区分和测量<sup>[7]</sup>。其次是设计特殊光栅结构通过光纤和光栅本身特性区分对不同参量的响应<sup>[8]</sup>。以上两种方法一般只能实现对两个参量的同时传感,且不适用于分布式测量,要实现三个及以上参量的同时和分布式测量通常需采用复用技术。Murphy等<sup>[9]</sup>提出了一种基于级联LPFG的频分复用技术,两个间隔光纤长度不同的级联LPFG串接,利用其干涉条纹特征频率不同,通过频域滤波获得各特征频谱,并通过各自的相位解调得到不同被测量。频分复用技术原理和结构简单,经过合理设计可推广到多个参量传感,但需要后续信号处理过程,在有效区分特征频率的过程中往往需要较长的间隔光纤,从而影响传感单元结构的紧凑性。Lin等<sup>[10]</sup>提出了基于时分复用技术的分布式传

感系统设计,利用不同传感点LPFG传回信号之间的时间延迟来区分各个传感点的信号,该技术为LPFG分布式传感提供了很好的思路,但对电路、光源和系统设计的要求较高。

本文提出一种基于波分复用(WDM)的LPFG光化学多参量传感技术。各LPFG串接在同一光纤中,通过设计各LPFG的光栅周期,并进一步通过包层腐蚀或镀膜调整各LPFG特征峰位置,使各LPFG的特征峰在观察波长范围内相互错位,相邻LPFG间的连接光纤不去除涂覆保护层,前一个LPFG激发的包层模不能传输到下一个LPFG,系统输出光谱为各LPFG光谱的叠加,不同参量变化使各LPFG特征峰的移动相互独立,通过考察系统输出复合光谱中各特征峰的偏移而得到各被测量的值。本文设计了三参量光化学传感系统,利用镀聚丙烯胺盐酸盐/聚丙烯酸(PAH/PAA)薄膜LPFG、薄包层LPFG和镀 $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ 复合薄膜LPFG分别实现对pH值、NaCl溶液浓度 $c$ 和相对湿度(RH)的传感。

## 2 原 理

基于WDM的LPFG多参量传感系统结构如图1所示,各个传感单元LPFG串行连接,相邻LPFG之间的连接光纤不去除涂覆保护层,前一个LPFG激发的包层模将由于保护层的吸收损耗而不能传输到下一个LPFG,因而系统最后的输出光谱等效于各个LPFG透射谱的算术叠加。WDM系统设计思路的着手于LPFG谐振峰的带宽特性和相邻级次包层模谐振峰的波长间隔之间的关系,波长间隔一般大于谐振峰带宽,且使多个谐振峰合理地分布在这个波长间隔内。根据模式耦合理论,纤芯模与1阶 $m$ 次包层模式之间发生耦合需满足相位匹配条件<sup>[11]</sup>:

$$\lambda_{\text{res}} = [n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda_{\text{res}}) - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda_{\text{res}})]\Lambda, m = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

式中  $\lambda_{\text{res}}$  为谐振波长,  $\Lambda$  为光栅周期,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$  分别为纤芯模与  $m$  次包层模的有效折射率, 图 2 为根据相位匹配条件作出的 LPFG 在 1200~1700 nm 波长范围内的相位匹配曲线(PMC), 对于圆对称折射率调制的 LPFG, 纤芯模只能被耦合到 1 阶包层模, 且偶次包层模耦合强度远远小于奇次包层模<sup>[12]</sup>, 因此, 图 2 中仅给出奇次包层模耦合的 PMC。图 2 中所示的  $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_8$  分别对应  $m$  次包层模耦合谐振峰处于 1650 nm 时的光栅周期( $m = 3, 5, \dots, 17$ ), 代表光栅周期的各竖直线与相邻低次 PMC 的交点即为相邻低次包层模耦合的谐振波长, 该点波长与 1650 nm 之间的差即为间隔波长范围。由图 2 可见, 间隔波长范围  $\Delta\lambda$  随包层模级次增大而增大, 当  $\Lambda = 257$  mm 时,  $m = 15$  与  $m = 13$  的谐振波长之差可

达 350 nm 左右, 这是一个相当可观的可供 WDM 的波长范围, 与之相比, LPFG 谐振峰的带宽通常要小得多, 这为 WDM 系统的设计提供了可能性。需要注意的是,  $m = 17$  的 PMC 已与竖直线相切, 即出现了相位匹配转折点<sup>[13]</sup>,  $m$  继续增大而光栅周期减小时, 在 1200~1700 nm 波长范围内将出现双峰谐振现象<sup>[14]</sup>, 因而  $m$  继续增大并不能持续增大可用间隔波长范围。因此, 对于 WDM 系统设计而言, 需选取在考察波长范围内 PMC 呈单调变化的高次包层模, 并尽可能地获得相对较宽的间隔波长范围。图 3 给出了相应的 LPFG 透射谱, 可以更直观地观察间隔光谱范围, 图中选取的光栅周期使各 LPFG 在 1200~1700 nm 波长范围内的最高次包层模耦合谐振峰位于 1650 nm。

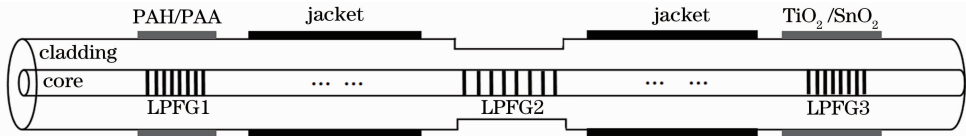


图 1 基于 WDM LPFG 光化学多参量传感系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of multi-parameter photochemical sensing system for LPFG based on WDM

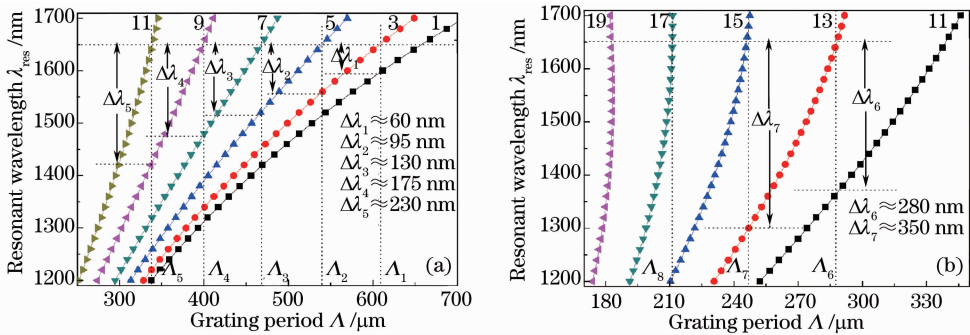


图 2 LPFG 的相位匹配曲线。(a)  $m = 1 \sim 11$ ; (b)  $m = 11 \sim 19$

Fig. 2 Phase-matching curves of a LPFG. (a)  $m = 1 \sim 11$ ; (b)  $m = 11 \sim 19$

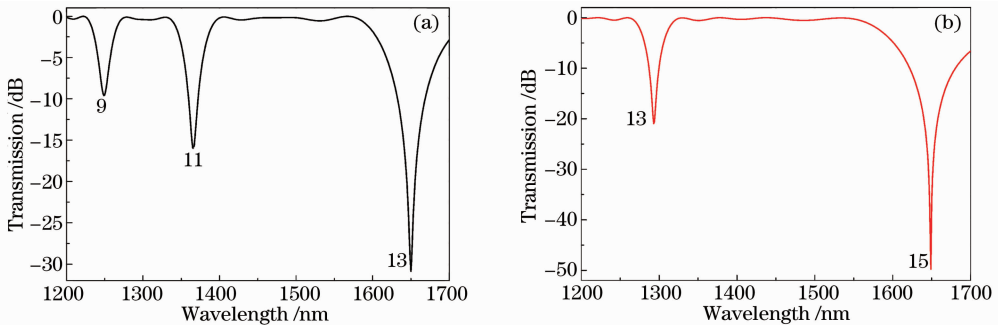


图 3 LPFG 的透射谱。(a)  $\Lambda = 288.0$  mm,  $L = 9.5$  mm,  $m = 9, 11, 13$ ; (b)  $\Lambda = 245.9$  mm,  $L = 9.7$  mm,  $m = 13, 15$

Fig. 3 Transmission spectra of LPFGs. (a)  $\Lambda = 288.0$  mm,  $L = 9.5$  mm,  $m = 9, 11, 13$ ;

(b)  $\Lambda = 245.9$  mm,  $L = 9.7$  mm,  $m = 13, 15$

WDM 系统的设计就是利用 LPFG 相邻高次包层模耦合谐振峰之间的宽谱波长间隔,通过设计各个传感单元 LPFG 的结构参数使各个 LPFG 的特征谐振峰处于另一个光栅谐振峰的间隔波长范围内,从而保证各个 LPFG 的特征峰在波长范围内相互错位。LPFG 特征峰位置通常由几种因素共同决定。LPFG 制作时设定的光栅周期是主要的决定因素,曝光时的激光脉冲强度和曝光时间以及后续的热处理也将影响特征峰位置。包层腐蚀时,由于包层半径减小导致包层模有效折射率减小,特征峰将向长波长方向移动。而对于用于光化学传感的镀膜 LPFG 而言,高折射率薄膜的镀制将使包层模有效折射率增大而使特征峰向短波长方向移动。实验中将综合考虑以上因素,使 WDM 系统中各 LPFG 的特征峰合理分布于光谱空间。上述分析的系统由于各个 LPFG 间没有包层模的传输影响,因而系统输出的复合光谱中,各个传感单元 LPFG 由相应被测介质变化而引起的谐振峰偏移相互独立。因此,可以通过直接考察各特征峰单独的偏移而得到各自的被测参量值,WDM 系统中单个传感单元 LPFG 的传感机制和结构设计方法与一般的均匀 LPFG 相同。

### 3 光化学三参量传感实验

实验中,以光化学三参量传感系统为例建立基于 WDM 的 LPFG 传感系统,分别利用镀 PAH/PAA 薄膜 LPFG、薄包层 LPFG 和镀 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 复合薄膜 LPFG 实现对溶液 pH 值、NaCl 溶液浓度 *c* 和环境湿度 RH 的传感。实验中所用光纤为 Corning 公司的 SM-28,采用波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光通过逐点曝光刻制形成 LPFG,激光脉冲能量为 25 mJ,脉冲频率为 150 Hz,单点曝光时间

为 10 s,光栅刻制完成后在 120 °C 环境下退火 12 h,三个 LPFG 退火后的透射谱如图 4 所示,相应的光栅参数见表 1。

表 1 三个 LPFG 的结构参数

Table 1 Structural parameters of LPFGs

	Measured	$\Lambda / \mu\text{m}$	$L / \text{cm}$	$\lambda / \text{nm}$
LPFG1	pH	238	2.5	1420.8
LPFG2	<i>c</i> (NaCl)	305	2.7	1303.6
LPFG3	RH	240	2.4	1435.8

#### 3.1 pH 传感单元

pH 传感单元采用 LPFG1,并在包层表面通过静电自组装法<sup>[15]</sup>镀制 PAH/PAA 薄膜。实验中所用的聚阳离子电解质为(PAH,分子量为 15000;聚阴离子电解质为 PAA,分子量为 450000)。PAH 和 PAA 均用去离子水配制成质量浓度为 2 g/L 的溶液,并通过滴加摩尔浓度为 0.1 mol/L 的 HCl 或 NaOH 溶液,将 PAH 和 PAA 溶液的 pH 值均调节为 4.5。经去离子水清洗的光纤光栅在摩尔浓度为 1 mol/L 的 KOH 溶液中浸泡 10 min,取出后经大量去离子水清洗并放于干燥箱中在 60 °C 条件下干燥 30 min,处理后的光栅表面带负电荷。镀膜时将 KOH 处理后的光栅交替浸入 PAH 和 PAA 溶液中,浸泡时间均为 2 min,每次浸泡后需经去离子水清洗以去除表面多余的聚离子,光栅通过光纤与宽带光源和光谱仪(OSA)相连以实时监测镀膜过程中的透射谱。镀膜完成后将镀膜后的光纤光栅置于恒温鼓风干燥箱中在 60 °C 条件下热处理 60 min。上述条件下镀制的每层 PAH/PAA 薄膜厚度约为 8 nm<sup>[16]</sup>,实验中所镀薄膜为 53 层 PAH/PAA,相应的薄膜厚度为 424 nm。PAH/PAA 薄膜的折射率为 1.55<sup>[17]</sup>,424 nm 的薄膜厚度可使 LPFG 薄膜传感器具有较高的响应灵敏度<sup>[18]</sup>。镀膜后的谐振波长减小到 1314.4 nm,峰值损耗随之减小,这是由于薄膜的沉积使包层模有效折射率增大而使谐振波长减小,同时耦合强度减小。此外,PAH/PAA 薄膜的折射率虚部不为零,薄膜的吸收损耗也是峰值损耗减小的重要因素。PAH/PAA 薄膜对于溶液 pH 值变化的响应机制在于 pH 值变化引起的薄膜的溶胀和收缩效应<sup>[17]</sup>,pH 值变化将引起薄膜厚度的变化从而导致 LPFG 谐振峰的偏移。实验测量所用的 pH 缓冲液按 pH 值的定义用 HCl、NaOH 和去离子水配制,传感器对酸性溶液 pH 传感实验结果如图 5 所示,pH 从 4 变化到 7 时谐振峰向长波长方向偏移,谐振波长随 pH 值呈单调递增变化,总偏移

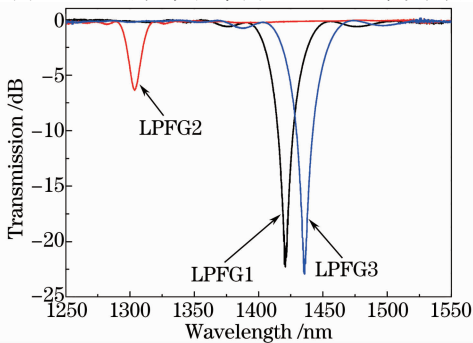


图 4 退火后三个 LPFG 的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of the three LPFGs after annealing

量达 5.6 nm, 灵敏度约为 1.86 nm/pHU (pHU 为 pH 单位)。碱性溶液 pH 传感实验结果如图 6 所示, pH 值从 7 变化到 10 时谐振波长随 pH 值同样

呈单调变化, 谐振峰向短波长方向偏移, 灵敏度约为 2.00 nm/pHU, 传感器对碱性溶液的 pH 灵敏度略高于酸性溶液。

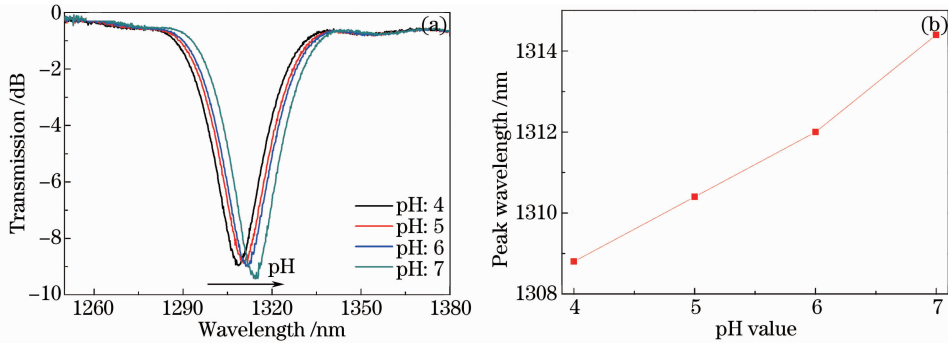


图 5 酸性溶液 pH 变化的光谱响应。(a) 谐振峰偏移; (b) 峰值波长随 pH 值的变化关系  
Fig. 5 Spectral response to pH value in acidic solution. (a) Resonance peak shift; (b) dependence of peak wavelength on pH value

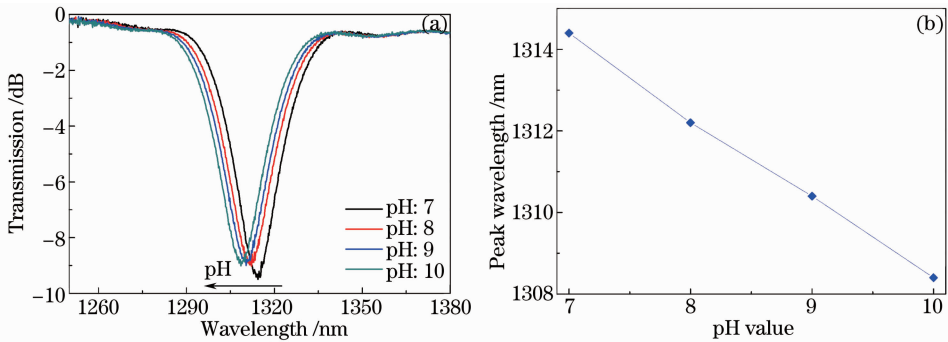


图 6 碱性溶液 pH 变化的光谱响应。(a) 谐振峰偏移; (b) 峰值波长随 pH 值的变化关系  
Fig. 6 Spectral response to pH value in alkaline solution. (a) Resonance peak shift; (b) dependence of peak wavelength on pH value

### 3.2 NaCl 溶液浓度传感单元

不同的 NaCl 溶液浓度(质量分数)对应于不同的液体折射率<sup>[2]</sup>, NaCl 溶液浓度传感采用经包层腐蚀的 LPFG2, 包层半径的减小不仅可以有效调整谐振峰的位置<sup>[19]</sup>, 而且可以在很大程度上提高 LPFG 对环境折射率的响应灵敏度<sup>[20]</sup>。实验中采用 HF 溶液

对光纤包层进行腐蚀, 所用的 HF 溶液按纯氢氟酸与去离子水的质量比为 2:3 配制。腐蚀过程中通过 OSA 实时监测谐振峰的位置及损耗, 腐蚀时间为 57 min, 随着腐蚀过程的进行, 谐振峰逐渐向长波长方向移动, 同时峰值损耗增大, 腐蚀结束时谐振峰位于 1489.6 nm。图 7 为薄包层 LPFG 溶液浓度传感的

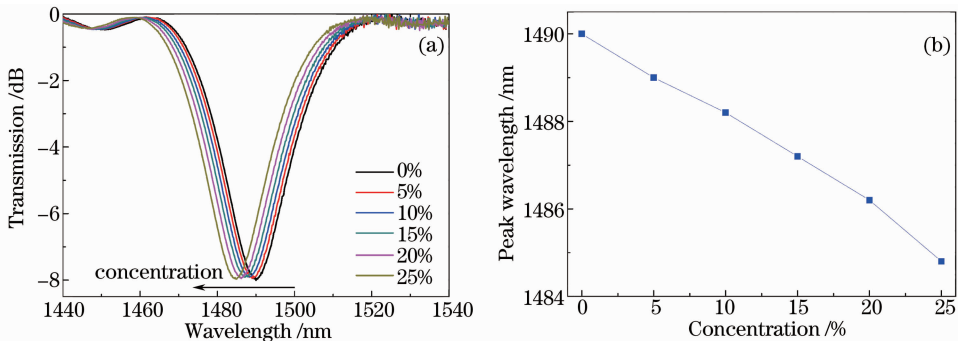


图 7 薄包层 LPFG 的 NaCl 溶液浓度传感。(a) 谐振峰偏移; (b) 峰值波长与溶液浓度关系  
Fig. 7 NaCl solution concentration sensing of thin cladding LPFG. (a) Resonance peak shift; (b) dependence of peak wavelength on solution concentration



实验结果,浓度从 0 变化到 25%时,峰值波长偏移量为 5.2 nm,相应的传感灵敏度约 0.21 nm/%。

### 3.3 湿度传感单元

相对湿度(RH)传感单元采用 LPFG3,并在表面采用溶胶凝胶法镀制 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 复合多孔薄膜。TiO<sub>2</sub> 系材料具有多孔结构,比表面积大,有极高的亲水性,已成为最具代表性和竞争力的一类湿敏材料。实验中按摩尔分数为 4% 掺杂 SnO<sub>2</sub>,适量掺杂 Sn<sup>2+</sup>可以降低 TiO<sub>2</sub> 的晶粒度,使 TiO<sub>2</sub> 薄膜具有纳米尺寸晶粒和纳米微孔,因而具有更大的比表面积和毛细管效应<sup>[21]</sup>。此外,由于 TiO<sub>2</sub> 和 SnO<sub>2</sub> 胶体混合时造成了微小聚集而使 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 薄膜表面要比 TiO<sub>2</sub> 薄膜粗糙得多,从而为水分子的吸附提供了较多的活性位置。表面经清洗的光栅浸入按比例配制并经老化的 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 混合溶胶溶液中,之后以 5 cm/min 的速率提拉成膜,镀膜后的光栅置

于管式电阻炉中进行热处理,升温速率为 3 °C/min,升温到 450 °C 后恒温煅烧 60 min,然后自然冷却至室温,最终得到热处理后的多孔 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 薄膜。薄膜退火后 LPFG 的谐振峰位于 1381.0 nm,峰值损耗为 3.22 dB。镀膜后谐振峰向短波长方向偏移了 54.8 nm,同时峰值损耗减小,峰值损耗减小的原因除薄膜因素外,高温退火过程对光栅特性的影响也是一个因素。不同相对湿度条件下的透射谱如图 8(a)所示,RH 增大时导致谐振峰向短波长方向偏移,RH 从 41% 增大到 93% 时谐振波长从 1381.0 nm 减小到 1374.6 nm,波长偏移量为 6.4 nm,则相应的 RH 分辨率约为 0.08%(OSA 的波长分辨率取 0.01 nm);而图 8(b)则显示,基于均匀 LPFG 结合 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 复合薄膜的湿度传感器对 RH 的响应具有较好的线性度。

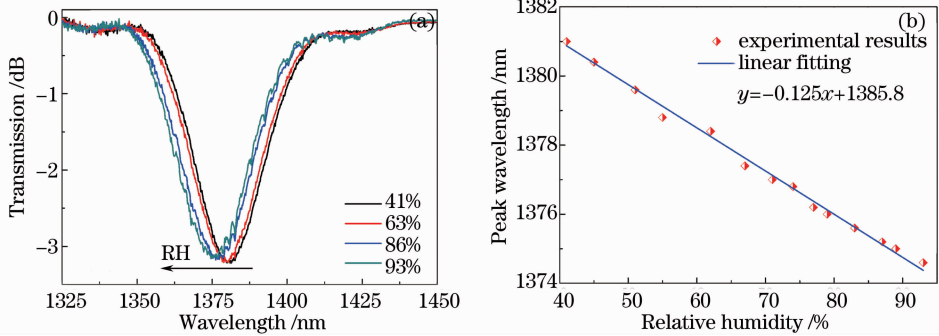


图 8 镀 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 薄膜 LPFG 的湿度传感。(a) 谐振峰偏移;(b) 峰值波长与湿度关系

Fig. 8 Relative humidity sensing of LPFG coated with TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> film. (a) Resonance peak shift; (b) dependence of peak wavelength on relative humidity

### 3.4 WDM 传感系统测试

基于 WDM 的光化学多参量传感实验系统如图 9 所示,将上述针对三个参量的传感单元通过连接光纤熔接在一起组成串行结构。图 10 为光化学多参量传感系统中三个 LPFG 均处于空气中测得的透射谱,图中数字标识 1、2、3 分别对应 pH 值、溶

液浓度和湿度传感的特征峰,由图 10 清晰可知,三个特征峰在观察波长范围内相互错位,可以保证单个参量发生变化时引起的谐振峰偏移不致对其余两个特征峰的观测产生影响。图 11 给出了不同参量取值组合时的光谱响应,如图 11(a)所示,当 pH 值



图 9 基于 WDM 的光化学三参量传感实验系统  
Fig. 9 Experimental system for tri-parameter photochemical sensing based on WDM

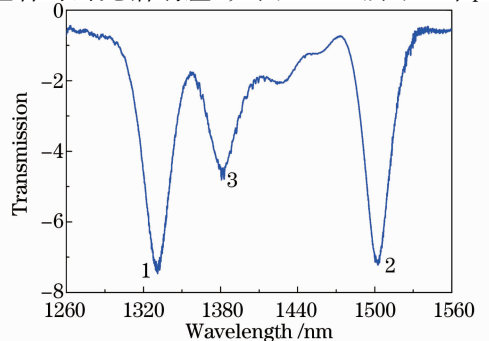


图 10 基于 WDM 的光化学多参量传感系统输出谱  
Fig. 10 Output spectrum of the multi-parameter photochemical sensing system based on WDM

固定,而湿度和 NaCl 溶液浓度发生变化时,特征峰 1 恒定不变,而特征峰 2 和 3 则向短波长方向发生了偏移,通过检测特征峰 2 和 3 的波长偏移量即可确定湿度值和 NaCl 溶液的浓度值。图 11(b)为湿度和溶液浓度保持不变而 pH 值发生变化时的复合光谱,同样可以通过观测特征峰 1 的变化而得到

pH 值。表 2 列出了与图 11 相应的特征峰数据以及相应的被测参量值。实验结果表明,经过合理结构设计的三个传感单元组成的 WDM 系统,可以在观察波长范围内有效区分对三个参量的响应,从而实现三个光化学参量的在线分布式检测。

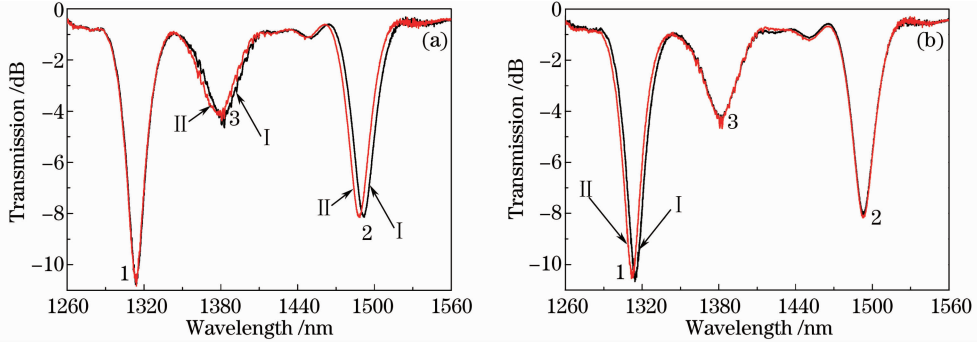


图 11 不同参量组合时多参量传感系统输出谱。(a) pH 值固定,湿度和浓度值变化;(b) 湿度和浓度值固定,pH 值变化

Fig. 11 Output spectra of multi-parameter photochemical sensing system for different parameters' combinations.

(a) When pH is fixed, RH and concentration change; (b) when RH and concentration are fixed, pH changes

表 2 不同参量组合时系统输出谱特征数据

Table 2 Characteristic data of the output spectra for different combinations of parameters

Fig. 11	Curve	$\lambda_1$ / nm	pH	$\lambda_2$ / nm	$c$ / %	$\lambda_3$ / nm	RH / %
(a)	I	1314.2	7	1490.0	0	1380.8	43
	II	1314.2	7	1486.6	20	1378.2	63
(b)	I	1312.2	8	1489.0	5	1380.4	45
	II	1310.4	5	1489.0	5	1380.4	45

## 4 结 论

提出了一种基于 WDM 的光化学多参量传感系统设计方法,利用各传感单元 LPFG 特征峰在观察波长范围内的错位分布实现对各参量的甄别和测量,LPFG 之间不存在包层模传输影响,消除了相互之间的串扰,通过针对各自特征峰的独立解调得到各被测参量值。实验中利用镀 PAH/PAA 薄膜 LPFG、薄包层 LPFG 和镀 TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> 复合薄膜 LPFG 实现了对 pH 值、NaCl 溶液浓度和相对湿度的传感。这种 LPFG 多参量传感技术原理与结构简单,针对单个参量的传感单元结构设计完全等同于普通的均匀 LPFG 传感器,其中的关键在于对单个 LPFG 结构进行设计时需综合考虑各个特征峰在波长范围内的合理分布。其次,由于 LPFG 之间不存在包层模传输,连接光纤的长度不受特定限制,因而非常适用于对多个参量的分布式测量。该实验仅对三个参量的传感系统作了初步的实验验证。通过进一步观察实验中的输出光谱可知,剩余光谱空间仍有增加复用特征峰的余地,经过优化设计,系统

中复用的传感单元个数可进一步增加,这点同样有利于实现多点分布式传感。此外,若在系统中接入一个合适特征峰位置的参考光栅,用各个传感单元特征峰与参考光栅谐振峰的相对变化量来表征各参量的变化,则可以消除环境温度变化带来的串扰。这种基于 WDM 的多参量光化学传感系统有望应用于环境参量监测、工业过程环境控制等领域,可实现对光化学环境参量的实时在线和分布式测量。

## 参 考 文 献

- Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905003.  
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905003.
- Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0305003.  
顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0305003.
- N D Rees, S W James, R P Tatam, *et al.*. Optical fiber long-

- period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(9): 686–688.
- 4 Yu Xiujuan, Zhang Min, Wang Liwei, *et al.*. Characteristics of long-period optical fiber grating with high refractive index nm-thick film overlay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2665–2672.  
于秀娟, 张敏, 王利威, 等. 镀高折射率纳米膜的长周期光纤光栅特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2665–2672.
- 5 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. Mode transition in absorption film coated long-period fiber grating and response characteristics of refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0707003.  
顾争先, 蓝锦龙. 镀膜吸收型膜长周期光纤光栅模式转换与折射率响应特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0707003.
- 6 Zhan Yage, Wu Hua, Xu Yumin, *et al.*. Multi-parameter and multi-functional fiber grating sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(9): 47–54.  
詹亚歌, 吴华, 许毓敏, 等. 多参量和多功能型光纤光栅传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(9): 47–54.
- 7 V Bhatia, D Campbell, R O Claus, *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(9): 648–650.
- 8 Tong Zhengrong, Guo Yang, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain based on a long-period fiber grating combined with a Lyot fiber filter in a linear configuration [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0305002.  
童峥嵘, 郭阳, 杨秀峰, 等. 基于 Lyot 滤波器和长周期光纤光栅的温度与应变的同时测量[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0305002.
- 9 R P Murphy, S W James, R P Tatam. Multiplexing of fiber-optic long-period grating-based interferometric sensors[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(3): 825–829.
- 10 H S Lin, M R Mokhtar, F A Rahman, *et al.*. Simultaneous spectra recovery of long-period grating sensor array using optical time-division multiplexing[J]. *Optik*, 2012, 123(7): 650–652.
- 11 T Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1277–1294.
- 12 T Erdogan. Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1760–1773.
- 13 Shu X, Zhang L, Bennion L. Sensitivity characteristics near the dispersion turning points of long-period fiber gratings in B/Ge codoped fiber[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(22): 1755–1757.
- 14 X W Shu, D X Huang. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- $\mu\text{m}$ -period fiber grating[J]. *Opt Commun*, 1999, 171(1-3): 65–69.
- 15 I D Villar, M Achaerandio, I R Matias, *et al.*. Deposition of overlays by electrostatic self-assembly in long-period fiber gratings[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(7): 720–722.
- 16 S S Shiratori, M F Rubner. pH-dependent thickness behavior of sequentially adsorbed layers of weak polyelectrolytes [J]. *Macromolecules*, 2000, 33(11): 4213–4219.
- 17 J M Corres, Del 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.
- 18 Ou Qibiao, Peng Yulin, Zeng Qingke, *et al.*. Impact of film thickness on modes reorganization of coated long period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s2): s205001.  
欧启标, 彭宇林, 曾庆科, 等. 薄膜厚度对镀膜长周期光纤光栅模式重组的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(s2): s205001.
- 19 S A Vasiliev, E M Dianov, D Varelas, *et al.*. Postfabrication resonance peak positioning of long-period cladding-mode-coupled gratings[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(22): 1830–1832.
- 20 H Y Chen, Z T Gu. Characteristics of a long-period fiber grating with reduced cladding for refractive index sensing[J]. *J Mod Optic*, 2011, 58(18): 1659–1665.
- 21 Z M Shi, L Yan, L N Jin, *et al.*. The phase transformation behaviors of  $\text{Sn}^{2+}$ -doped Titania gels[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2007, 353(22): 2171–2178.

栏目编辑: 王晓琰