

doi: 10.3788/gzxb20134209.1046

# Pt/WO<sub>3</sub> 光纤光栅氢气传感器改性研究

李智<sup>1</sup>, 杨明红<sup>1</sup>, 代吉祥<sup>1</sup>, 杨志<sup>1</sup>, 张毅<sup>2</sup>, 庄志<sup>2</sup>

(1 武汉理工大学 光纤传感国家工程实验室, 武汉 430070)

(2 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621907)

**摘 要:** 将优化制备工艺的 Pt/WO<sub>3</sub> 薄膜与增敏的光纤光栅相结合制备氢气传感器探头, 使传感器的性能得到大幅改进. 氢敏测试实验结果表明: 经过 315℃ 热处理铂钨比为 1:5 的 Pt/WO<sub>3</sub> 薄膜具有更好的氢气响应能力; 经过施加轴向预应力结构增敏的光纤光栅温度灵敏度为 16.3 pm/℃, 大约是裸光栅的两倍; 改性后的光纤光栅氢气传感器在氢气浓度为 10 000 ppm、2 000 ppm、400 ppm 时, 中心波长漂移量分别对应为 720 pm、115 pm、20 pm, 并在 1 min 内达到最大漂移值, 氢气浓度每变化 0.01%, 波长漂移分别达到 7.2 pm、5.7 pm、5 pm, 氢气最低检测极限可达到 0.04%.

**关键词:** Pt/WO<sub>3</sub> 薄膜; 温度增敏; 氢敏性能; 光纤布喇格光栅

中图分类号: TP212.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1046-6

## Improvment Research of Fiber-optic Hydrogen Gas Sensor Using Pt Catalyzed Tungsten Trioxide

LI Zhi<sup>1</sup>, YANG Ming-hong<sup>1</sup>, DAI Ji-xiang<sup>1</sup>, YANG Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, ZHUANG Zhi<sup>2</sup>

(1 National Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2 China Academy Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621907, China)

**Abstract:** The hydrogen sensor probe is prepared by combining Pt-loaded WO<sub>3</sub> coating with optimized synthesized process and enhanced temperature sensitivity fiber Bragg grating. In this way, the performance of the hydrogen sensor can be significantly improved. The experimental results show that Pt-loaded WO<sub>3</sub> coating annealed under 315℃ for an hour has better sensitivity toward hydrogen when Pt : W ratio is controlled at 1 : 5. The temperature sensitivity of fiber Bragg grating which is enhanced by exerting axial prestress is 16.3 pm/℃, which is nearly twice of common fiber Bragg grating. When hydrogen concentration are 10 000 ppm, 2 000 ppm and 400 ppm, the wavelength shifts of fiber Bragg grating are 720 pm, 115 pm and 20 pm respectively, and fiber Bragg grating can reach its maxium wavelength shift within one minute. Moreover, the wavelength shift equal to 7.2 pm, 5.7 pm, 5 pm per 0.01% of H<sub>2</sub> concentration and the therhold of hydrogen sensor can reach to 0.04%.

**Key words:** Pt-loaded WO<sub>3</sub> coating; Enhanced temperature sensitivity; Hydrogen sensitivity; Fiber Bragg Grating(FBG)

## 0 引言

氢气作为一种极具前景的清洁能源和重要的化

工原料, 被广泛运用到航空航天、燃料电池、金属冶金、食品化工等领域. 由于在存储、运输和使用过程中氢气极易泄漏, 进而可能导致爆炸事故, 因此实时

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 62190311)和教育部新世纪优秀人才计划(No. NECT-10-0664)资助

第一作者: 李智(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤氢气传感. Email: yilizhier@whut.edu.cn.

导师(通讯作者): 杨明红(1975—), 男, 研究员, 主要研究方向为薄膜光电子器件及光纤传感器. Email: minghong.yang@whut.edu.cn

收稿日期: 2013-03-07; 录用日期: 2013-04-22

准确地检测氢气浓度在这些领域至关重要。

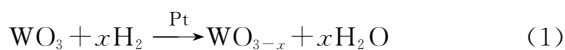
光纤氢气传感器<sup>[1-2]</sup>利用光信号作为传感和解调介质,具有体积小、重量轻、性能稳定、本质防爆、抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高优点,从而引起了广泛的关注.其中光纤光栅氢气传感器除了具有光纤氢气传感器的特点外,还能利用光栅与光纤之间的兼容性,在一根光纤上串联多个光纤光栅构成光纤光栅阵列或者采用波分复用技术,实现多点分布式传感<sup>[3]</sup>,这对于实际氢气检测具有重要意义。

文献<sup>[4-5]</sup>采用溶胶凝胶法制备出了 Pt/WO<sub>3</sub> 光纤光栅氢气传感器<sup>[6]</sup>,该传感器对 4% 浓度的氢气产生 140 pm 波长变化,响应速度仅为 15 s,稳定性、重复性均良好.与基于磁控溅射钯膜的光学型氢气传感器<sup>[7-10]</sup>相比,溶胶凝胶法制备出的敏感材料呈纳米级,氢敏活性高、传感效果更好,不会出现多次循环后脱层、起泡等现象,从而提高了传感器的使用寿命.因此该传感器已成为目前传感器研究的热点之一.不过该传感器的缺点在于,它是一种自发热型氢气传感器,对高浓度氢气具有潜在的爆炸危险性,进一步优化设计以保证传感器本质安全是亟待解决的问题;同时目前工艺所制得 Pt/WO<sub>3</sub> 敏感材料对低温下低浓度氢气检测效果差、灵敏度低,这极大地阻碍了该传感器的发展.为改进传感器性能,Christophe Caucheteur<sup>[11]</sup>等对 Pt/WO<sub>3</sub> 敏感材料在 500 °C 下进行热处理 1 h,利用长周期光栅作为涂覆介质,将 Pt/WO<sub>3</sub> 光纤光栅氢气传感器检测阈值降低到 0.6%,氢气浓度每变化 0.1% 对应传感器波长变化 198 pm.该方法提高了传感器的性能,但仍达不到实际运用中对传感器灵敏度和最低检测极限的要求。

本文在溶胶凝胶法制备的 Pt/WO<sub>3</sub> 光纤光栅氢气传感器上进行了优化改进,选择了合适的铂钨比、热处理温度<sup>[12-13]</sup>以改善敏感材料的氢敏性;对传感探头进行了基于玻璃基底的轴向预应力封装,避免了由于敏感材料中 WO<sub>3</sub> 强的氧化性导致的敏感材料被污染和封装材料的腐蚀破坏以及因弹性衬底材料收缩导致的啁啾现象,从而有效地提高了传感器的灵敏度、检测极限、稳定性<sup>[14]</sup>。

## 1 基本原理

Pt/WO<sub>3</sub> 光纤光栅氢气传感器的工作原理为



在 Pt 的催化作用下,氢气被吸附并分解为氢原子,当与 WO<sub>3</sub> 接触时发生可逆反应产生热效应,正

反应为放热反应。

根据光纤光栅模式耦合原理,光纤布喇格光栅中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (3)$$

$\lambda_B$  为光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的中心波长, $n_{\text{eff}}$ 为 FBG 的有效折射率(折射率调制幅度大小的平均效应), $\Lambda$ 为 FBG 的周期(折射率调制的空间周期).对式(3)取微分得

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda \quad (4)$$

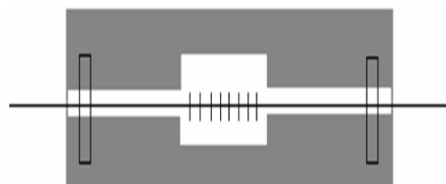
正反应放热使得光栅区域产生热膨胀和热光效应,引起光栅周期和光栅折射率变化,最终导致反射光中心波长的漂移,通过检测反射波长的漂移可以检测对应氢气浓度<sup>[15-16]</sup>.这是一种基于自发热传感机制的氢气检测手段,引发这种传感机制需要的活化能为 0.015 eV<sup>[11]</sup>,所以检测氢气浓度存在下限,对低于该浓度的氢气,传感器将无法响应。

温度应力交叉敏感问题是光纤光栅传感器的固有问题,无法完全消除<sup>[17]</sup>.实际运用中,需设法降低其带来的影响.本文测试传感器氢敏性能时,通过放置参考光栅来补偿环境温度变化带来的影响,有效解决了交叉敏感问题.另外,在此基础上对光栅进行温度增敏,能有效提高传感器的传感效率,改善传感器的灵敏度和检测阈值,减少敏感材料的用量,进一步降低材料使用量和因此产生的发热量,有利于优化传感器设计和使用性能。

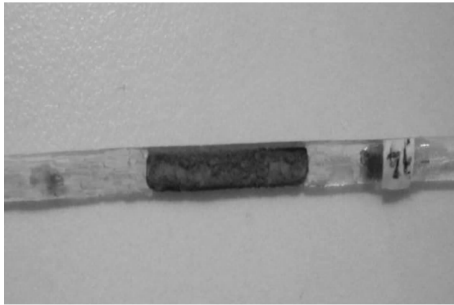
## 2 实验

称取一定量 Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 进行离子交换得到水合钨酸,再与 H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> · 6H<sub>2</sub>O 均匀混合,得到产物加入适量等离子水,离心清洗 15 次,然后烘干研磨,在一定温度下热处理 1 h,最后再次研磨并进行超声振荡仪振荡分离得到纳米级敏感材料.实验通过改变 Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 及 H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> · 6H<sub>2</sub>O 的加入量和热处理温度制得四种不同工艺的 Pt/WO<sub>3</sub> 材料:铂钨比 1 : 5、热处理温度 315 °C;铂钨比 1 : 9、热处理温度 315 °C;铂钨比 1 : 9、热处理温度 300 °C;铂钨比 1 : 9、热处理温度 400 °C。

如图 1 所示,采用玻璃片作为封装基底,用氢氟酸腐蚀得到矩形槽.在光栅两端施加一定张应力,将裸光栅光栅区域去掉涂覆层后,置于凹槽中间位置,



(a) Schematic diagram of the probe



(b) Photo of the probe

图1 光纤光栅氢气传感探头

Fig. 1 The hydrogen sensing probe of FBG

用环氧树脂将光栅两端光纤与玻璃基底固定在一起。

分别取四种不同工艺制得的 Pt/WO<sub>3</sub>，加入少量去离子水，并用超声振荡仪振荡，使样品与水均匀混合，然后涂覆在光栅上，用加热装置烘干薄膜中的水分，制得四种不同工艺材料制备的氢气传感器，最后进行氢气响应实验。

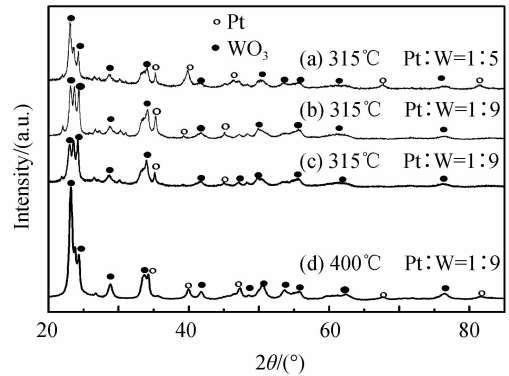
### 3 氢敏材料的表征分析

为进一步了解材料组成及其微观结构，本文对4种不同工艺制备的 Pt/WO<sub>3</sub> 材料进行了X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)测试，并主要对315℃热处理铂钨比为1:5的敏感材料进行了扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试分析。

如图2(c)和(d)，铂钨比均为1:9时，400℃热处理的样品中WO<sub>3</sub>与Pt的特征峰更强。除在34°(左右均存在较强的铂相特征峰外，400℃热处理过的样品在2θ为39.8°、46.2°、67.4°、82°处均存在明显的铂相特征峰，300℃热处理的样品只在46°处出现很弱的特征峰，说明热处理温度升高能提高氯铂酸的分解率，使得铂的存在状态逐渐从300℃时的化合态转变为单质态。但400℃热处理的样品中WO<sub>3</sub>的结晶度很高，同时晶相由斜方相转变为单斜相，导致材料致密且变性，对氢气响应能力变弱。

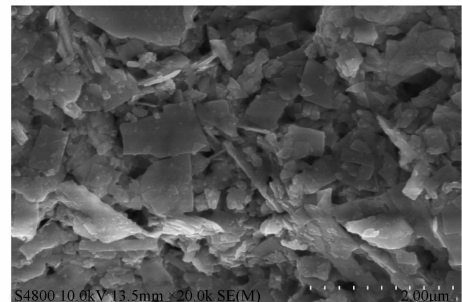
对比图2(b)和(c)，315℃热处理铂钨比为1:9的样品中WO<sub>3</sub>特征峰比300℃热处理铂钨比为1:9的样品WO<sub>3</sub>特征峰更强且在2θ为38°处铂相特征峰更明显。这是由于保持铂钨比为1:9不变，随热处理温度升高，各相结晶度均增大的缘故。

对比图2(a)和(b)，315℃热处理的样品随铂钨比增大，铂相对含量增大，WO<sub>3</sub>相对含量降低，进而导致热处理后铂相特征峰变强，WO<sub>3</sub>特征峰变弱。测试结果显示315℃热处理铂钨比为1:5的样品在2θ为34.5°、39.8°、46.2°、67.4°、82°处都出现了较明显的铂相特征峰，表明315℃时样品中氯铂酸已完全分解，铂的特征峰强于铂钨比为1:9的样品。

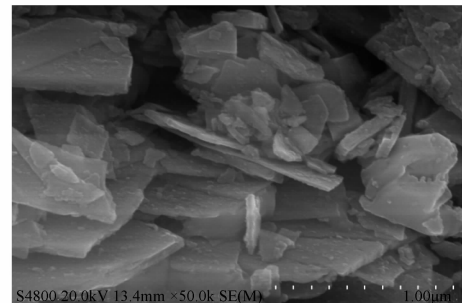
图2 不同工艺 Pt/WO<sub>3</sub> XRD 谱Fig. 2 X-ray diffraction of Pt-loaded WO<sub>3</sub> coating with different temperatures of heating treatment and ratio of Pt:W

通过对比可知315℃热处理铂钨比为1:5的样品中部分WO<sub>3</sub>呈非晶态，同时氯铂酸分解率较高，单质铂相较多。

图3是315℃热处理铂钨比为1:5的样品的SEM图。图中材料呈现片状结构，长度和宽度小于1 μm，厚度在40~50 nm，具有较大的表面积，材料不规则堆积形成间隙，这使得氢气在材料中更易扩散，提高了传感器对氢气的响应速率。



(a) 20,000 times magnification figure



(b) 50,000 times magnification figure

图3 315℃ Pt/W=1:5 SEM

Fig. 3 The morphology of Pt-loaded WO<sub>3</sub> coating under 315℃ with 1:5 Pt/W ratio

### 4 传感器性能测试与分析

#### 4.1 温度灵敏度测试

实验分别在20℃、30℃、40℃、50℃、60℃、70℃、80℃处进行恒温采样，并记录各温度阶段裸光栅和经施加轴向预应力封装的光纤光栅波长值。

如图 4 所示,施加轴向预应力的光纤光栅温度灵敏度相比裸光栅温度灵敏度提高将近一倍.分析认为:预加张应力可使两端被固定在有凹槽的玻璃基底上的光栅保持拉伸状态,受热时热效应使得光栅和玻璃同时发生膨胀,但由于普通钠钙玻璃的线膨胀系数是  $8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,而光纤纤芯 SiO<sub>2</sub> 材料的线膨胀系数是  $5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ .玻璃片热膨胀效应比光纤纤芯大的多,温度升高时,能够向光纤光栅施加应力,实现光栅温度增敏<sup>[14]</sup>.

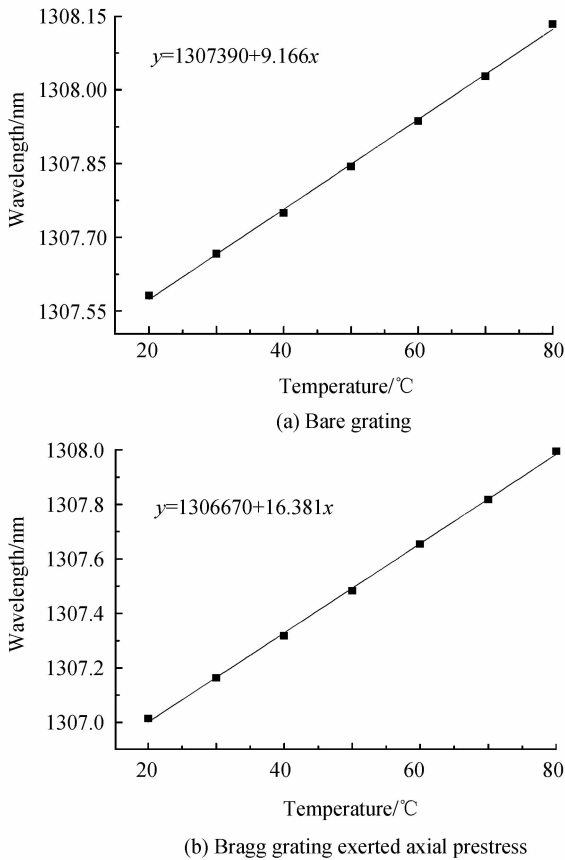


图 4 温度敏感特性曲线

Fig. 4 Temperature sensitive characteristic diagram

### 4.2 氢敏性能测试

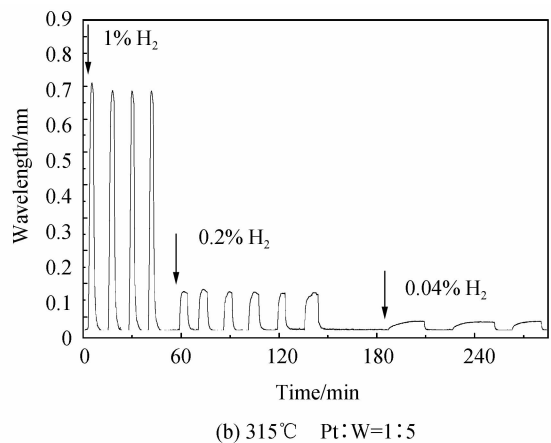
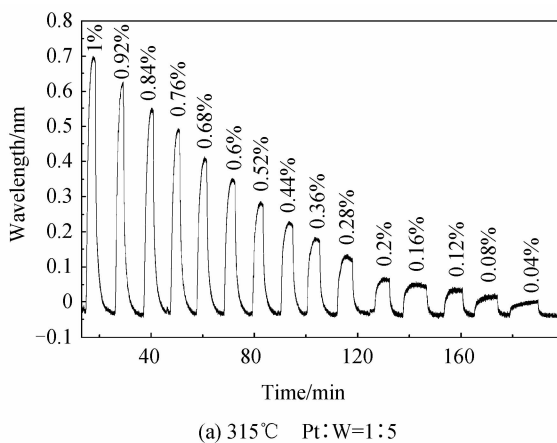
实验对改进前后的传感器进行了氢气响应特性

测试,并着重研究了 1%、0.2%、0.04% 氢气浓度下传感器的可重复性.为避免实验过程中环境温湿度变化引起的光栅波长漂移,本实验设置参考光栅进行空白对照,图 5 纵坐标均为传感器与参考光栅在相同实验条件下测试结果的差值.

如图 5(a) 所示,经过 315°C 热处理铂钨比为 1:5 的 Pt/WO<sub>3</sub> 制备并施加预应力封装的传感器在浓度为 1%、0.2%、0.04% 氢气中,波长漂移量分别为 720 pm、115 pm、20 pm,并在 1 min 内达到最大值,氢气浓度每变化 0.01%,波长漂移分别为 7.2 pm、5.7 pm、5 pm.从图 5(a) 和(b) 中可以看出随着被测氢气浓度的降低,传感器的灵敏度略有降低,受环境因素影响变大,但仍然可以准确检测浓度为 0.04% 的氢气.图 5(b) 显示传感器在氢气浓度为 1%、0.2%、0.04% 时呈现出良好的可重复性和稳定性.

如图 5(c) 所示,经过 315°C 热处理铂钨比为 1:9 的 Pt/WO<sub>3</sub> 制备并施加预应力封装的传感器在浓度为 1%、0.2%、0.04% 氢气中,波长漂移量分别为 500 pm、95 pm、10 pm,氢气浓度每变化 0.01%,波长漂移分别为 5 pm、4.2 pm、2.5 pm.与图(a) 相比,波长漂移变小,传感器灵敏度明显下降,说明铂钨比的降低使得材料氢敏性变差,但经过轴向预应力封装过的传感器仍具有良好的稳定性和可重复性.

如图 5(e) 和(f) 所示,利用经过 300°C 热处理铂钨比为 1:9 的 Pt/WO<sub>3</sub> 制备的传感器在氢气浓度为 1% 时波长漂移量为 70 pm.与图 5(a) 相比波长变化量大大降低,且变化逐渐呈现非线性;图 5(e) 中可看到,氢气浓度 0.2% 以下时传感器波长变化量较小,对浓度分辨率不高;当氢气浓度为 0.04% 时波长漂移几乎为零,波长变化受环境噪音影响很大.这表明经过 300°C 热处理铂钨比为 1:9 的样品对低于 0.04% 浓度以下的氢气不敏感.



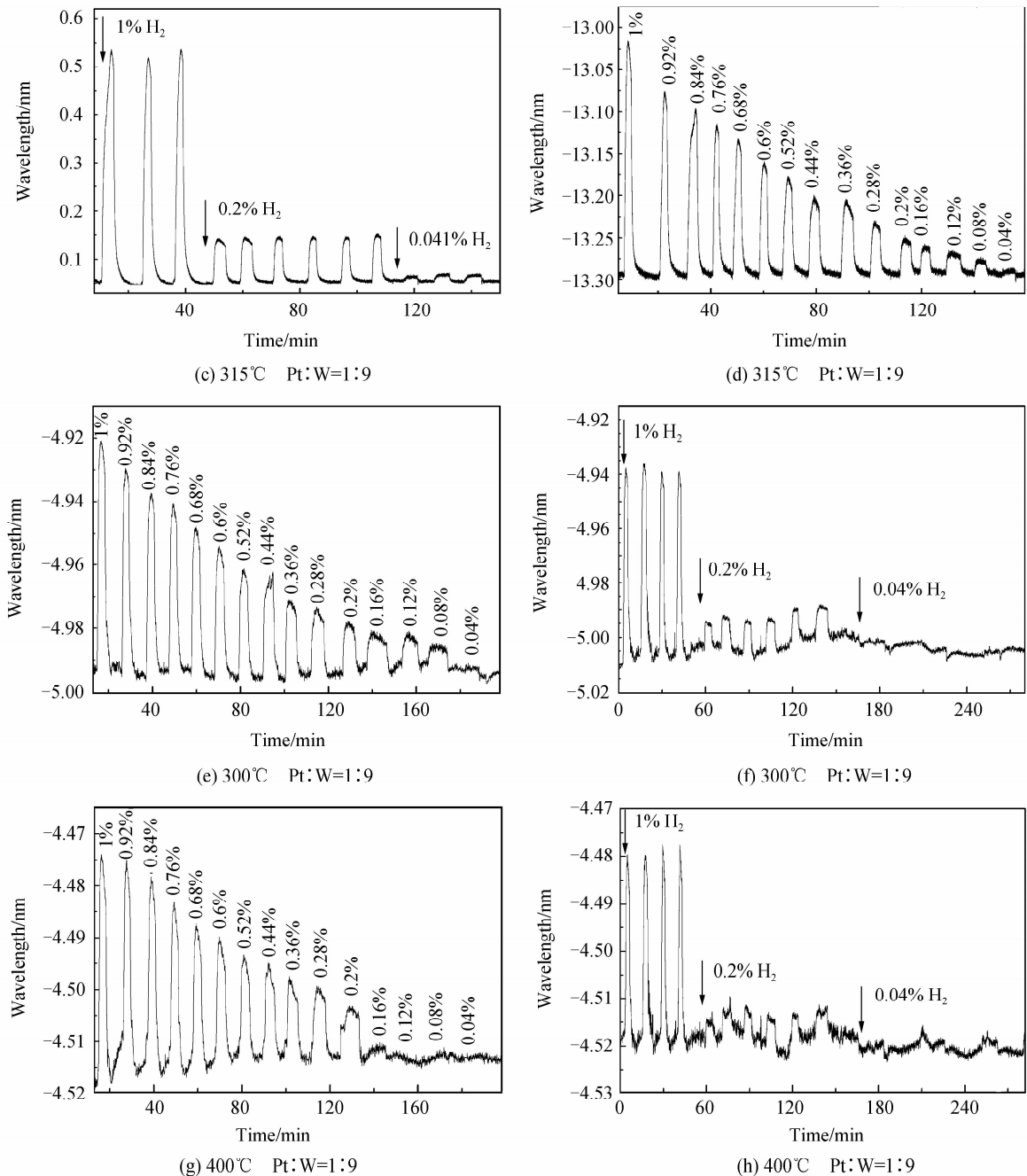


图5 不同浓度下的氢气响应曲线和特定浓度下的重复性响应曲线

Fig. 5 Hydrogen response curve of sensors under different hydrogen concentration and response curve of specific hydrogen concentrations

如图5(g)和(h)所示,利用经过400℃热处理铂钨比为1:9的Pt/WO<sub>3</sub>制备的传感器在氢气浓度为1%时波长漂移只有40 pm.从图5(g)图中可以看到当氢气浓度为0.2%时传感器波长变化量小于8 pm;重新通入空气后,波长不能恢复至初始值,表明传感器稳定性差.当氢气浓度为0.2%以下时传感器波长变化难以分辨,甚至没有响应.

通过分析可以知道,经过315℃热处理铂钨比为1:5的Pt/WO<sub>3</sub>对氢气活性较好,制得的传感器氢敏性能优良.敏感材料XRD测试显示热处理能使Pt/WO<sub>3</sub>中氯铂酸分解生成催化剂单质铂.但随

热处理温度升高,WO<sub>3</sub>结晶度增大甚至发生相变,材料结构更致密,会降低敏感材料活性.实验也证明铂钨比均为1:9,经过400℃热处理的Pt/WO<sub>3</sub>比经过300℃热处理的Pt/WO<sub>3</sub>制得的传感器氢敏性能更差,所以需要选择合适的热处理温度和铂钨比,以提高材料中非晶态成分和氯铂酸的分解率,改善敏感材料内部结构以增大孔隙率,得到更多的催化剂铂,进而提高材料对氢气的响应,最终改善传感器性能.实验表明315℃热处理的敏感材料中WO<sub>3</sub>存在一定量的非晶态成分,氯铂酸分解率较高,此时增大材料的铂钨比,有效地提高了材料催化活性,改善

了传感器的性能。

预应力封装对传感器性能提高也有着重要影响。施加轴向预应力能增大光栅区域的温度灵敏度,进而提高传感器的灵敏度。由于热传导效率的提高,用更少量的氢气敏感材料就能达到相同的传感效果,同时还使传感器在高浓度氢气下,温度的变化控制在氢气的燃点以下,从而达到本质安全的目的。

## 5 结论

本文从传感器封装和敏感材料热处理温度、铂钨比对 Pt/WO<sub>3</sub> 光纤光栅氢气传感器进行了优化改进。实验发现对光栅施加轴向预应力,能够实现温度增敏。315℃热处理铂钨比为 1:5 的 Pt/WO<sub>3</sub> 敏感材料中部分 WO<sub>3</sub> 呈非晶态且氯铂酸分解率高,使得材料结构得到改善,催化剂铂相增多,提高了敏感材料的氢敏活性。本文方法有效地改善了传感探头的氢敏性能,并使得氢气最低检测浓度达到 0.04%。

### 参考文献

- [1] HUBERT T, BOON-BRETT L, BLACK G, *et al.* Hydrogen sensors-A review[J]. *Sensors and Actuators B*, 2011, **157**(2): 329-352.
- [2] DAI Ji-xiang, YANG Minghong, CHEN Yun. Side-polished fiber Bragg grating hydrogen sensor with WO<sub>3</sub>-Pd composite film as sensing materials[J]. *Optical Express*, 2011, **19**(7): 6141-6148.
- [3] BUTTNER W J, POST M B, BURGESS R, *et al.* An overview of hydrogen safety sensors and requirements[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(3): 2462-2470.
- [4] YANG Ming-hong, YANG Zhi, DAI Ji-xiang, *et al.* Fiber optic hydrogen sensors with sol-gel WO<sub>3</sub> coatings[J]. *Sensors and Actuators B*, 2012, **166-167**: 632-636.
- [5] FARDINDOOST S, IRAJI ZAD A, RAHIMI F, *et al.* Pd doped WO<sub>3</sub> films prepared by sol-gel process for hydrogen sensing [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(2): 854-860.
- [6] YANG Zhi, YANG Ming-hong, DAI Ji-xiang, *et al.* Characteristic of Pt/WO<sub>3</sub> hydrogen sensitive material prepared by sol-gel method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1036-1040.  
杨志, 杨明红, 代吉祥, 等. 溶胶凝胶法制备 Pt/WO<sub>3</sub> 氢气敏感材料的研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1036-1040.
- [7] GRATAN K T V, SUN T. Fiber optic sensor technology: an overview[J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, **82**(1-3): 40-61.
- [8] LIU Hong-liang, YANG Ming-hong, DAI Ji-xiang, *et al.* Research on characteristic of fiber optic hydrogen sensor based on palladium and its composite films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3398-3402.  
刘宏亮, 杨明红, 代吉祥, 等. 基于钯及其复合膜的光纤氢气传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3398-3402.
- [9] DAI Ji-xiang, YANG Ming-hong, CHEN Yun, *et al.* Hydrogen sensor based on d-shaped fiber Bragg grating coated with WO<sub>3</sub>-Pd composite films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1003-1007.  
代吉祥, 杨明红, 程芸, 等. 基于 WO<sub>3</sub>-Pd 复合膜的 D 型光纤光栅氢气传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1003-1007.
- [10] MONZON-HERNANDEZ D, LUNA-MORENO D, MARTINEZ-ESCOBAR D. Fast response fiber optic hydrogen sensor based on palladium and gold nano-layers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, **136**(2): 562-566.
- [11] CAUCHETEUR C, DEBLIQUY M, LAHEM D, *et al.* Hybrid fiber gratings coated with a catalytic sensitive layer for hydrogen sensing in air[J]. *Optical Express*. 2008, **16**(21): 16854-16859.
- [12] YANG Xiao-hong, WANG Xin-qiang, TANG Yi-ke, *et al.* Study on optical and hydrogen sensing properties of nanocrystalline WO<sub>3</sub> films[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(11): 12-14.  
杨晓红, 王新强, 唐一科, 等. 纳米 WO<sub>3</sub> 薄膜的光学性质及氢敏特性研究[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(11): 12-14.
- [13] ZHUANG Lin, XU Xue-qing, SHEN Hui. Effect of annealing temperature on structure and gaschromic properties of WO<sub>3</sub> thin films[J]. *Materials Review*, 2002, **16**(4): 72-74.  
庄琳, 徐雪青, 沈辉. 热处理对 WO<sub>3</sub> 薄膜的结构和气致变色性能的影响 [J]. *材料导报*, 2002, **16**(4): 72-74.
- [14] FENG De-quan, WANG Hong-liang, LUO Xiao-dong, *et al.* A FBG packaging technique based on exerting prestress[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **11**(3): 1606-1608.  
冯德全, 王宏亮, 罗小东, 等. 一种基于施加预应力的 FBG 封装技术[J]. *光电子·激光*, 2011, **11**(3): 1606-1608.
- [15] ZHANG C, BOUDIBAA A, GEORGES M, *et al.* Sensing properties of Pt/Pd activated tungsten oxide films grown by simultaneous radio-frequency sputtering to reducing gases [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **175**: 53-59.
- [16] CHEN Shang-hui, LUO Jian-yi, TAN Hui-dong, *et al.* Study of self-heating phenomenon and its resultant effect on ultrafast gasochromic coloration of Pt-WO<sub>3</sub> nanowire films [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, **173**: 824 - 832.
- [17] LU Qie-ni, ZHANG Yi-mo, LIU Tie-gen, *et al.* Cross-sensitivity of fiber grating sensor measurements[J]. *Journal of Tianjin University*, 2002, **35**(4): 425 - 428.  
吕且妮, 张以谟, 刘铁根, 等. 一种基于施加预应力的 FBG 封装技术[J]. *天津大学学报*, 2002, **35**(4): 425-428.