

基于阵列波导光栅的光纤法布里-珀罗干涉仪型 多点氢气传感器

李嘉丽, 洪婉玲, 赵春柳*, 徐睿, 徐贲, 沈常宇, 王东宁

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 氢气作为一种清洁能源,在工业领域中得到了广泛的应用。然而,由于它分子质量轻,容易发生泄露,当其在空气中的体积比达到 4% 时就会存在爆炸的危险,因此对氢气浓度的检测在实际应用中非常重要。针对上述情况,提出一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)填充的法布里-珀罗干涉仪(FPI)型氢气传感器,通过引入阵列波导光栅(AWG),可以实现对多点氢气浓度的同时测量。所提出的传感器由单模光纤与空芯光纤(HCF)熔接,在 HCF 内部填充 PDMS,并在 PDMS 外表面涂覆 Pt/WO₃ 的方式制成。当 Pt/WO₃ 与氢气发生化学反应时,放出的热量使得氢气传感器的局部温度升高,PDMS 受热膨胀导致 FPI 内部的空气腔长缩短,这将导致干涉光谱的波长漂移,通过将传感器与 AWG 相连,可以将波长漂移解调为光强变化,进而实现多点氢气浓度的同时测量。

关键词 传感器; 法布里-珀罗干涉仪; 阵列波导光栅; 氢气浓度; 多点测量

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306013

Multi-Point Optical Fiber Hydrogen Sensor with Fabry-Perot Interferometers Using Arrayed Waveguide Grating

Li Jiali, Hong Wanling, Zhao Chunliu*, Xu Rui, Xu Ben, Shen Changyu, Wang Dongning

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract As a kind of clean energy, hydrogen has been widely used in industrial field. However, due to its light molecular weight, it is prone to leakage. When volume ratio of hydrogen in the air reaches 4%, there is a danger of explosion. Therefore, detection of hydrogen concentration is very important in practical applications. In view of the above situation, this paper proposes a Fabry-Perot interferometer (FPI) hydrogen sensor based on polydimethylsiloxane (PDMS) filling. By introducing an arrayed waveguide grating (AWG), it can detect hydrogen concentration at multi-point simultaneously. The proposed sensor is formed by fusion splicing a single mode fiber and a hollow core fiber (HCF), filling the HCF with PDMS and covering the outer surface of PDMS with Pt/WO₃. When Pt/WO₃ reacts with hydrogen chemically, released heat increases local temperature of the hydrogen sensor, and the thermal expansion of PDMS results in shortening the length of air cavity inside FPI, which will cause wavelength shift of interference spectrum. By connecting the sensor with the AWG, wavelength shift can be demodulated into light intensity change, so as to achieve simultaneous multi-point hydrogen concentration measurement.

Key words sensors; Fabry-Perot interferometer; arrayed waveguide grating; hydrogen concentration; multi-point measurement

OCIS codes 130.6010; 050.2770; 040.1240; 230.7370

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-04-18; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF021504)、国家自然科学基金面上项目(61775202)、国家自然科学基金(11874332)、国家市场监督管理总局支撑计划(2019YJ067)

通信作者: *clzhao@cjlu.edu.cn

1 引言

伴随着化石燃料使用所带来的日趋严重的环境问题,人类在探索新型清洁能源的道路上做了积极的研究。氢气作为一种高效、无污染、资源充足的清洁能源,在解决能源危机方面发挥了重要的作用^[1]。近年来,氢气在航空航天工程^[2]、电力^[3]、矿业^[4-5]、汽车^[6]等领域得到了广泛的应用。然而,氢气是一种易燃易爆的气体,其扩散系数高($0.16 \text{ cm}^2/\text{s}$)、燃烧热高(285.8 kJ/mol)、点火能量低(0.018 mJ)、爆炸体积分数范围宽($4\% \sim 75\%$)^[7],在其使用环境中,如果发生泄漏,将会造成极大的危险,因此,在氢气的生产、存储或者运输的任一环节,都需要对其浓度进行及时监测^[8]。

近年来,高性能的氢气传感器被大量研究和开发,其中光纤氢气传感器因其本质安全、可用于远距离传感、抗电磁干扰等优点,成为国内外研究的热点之一。根据测量原理的不同,强度型^[9-11]、光纤光栅型^[12-15]、干涉型^[16-18]和表面等离子体共振型^[19-21]光纤氢气传感器被提出和论证。其中,干涉型光纤氢气传感器因具有结构灵活、简单、灵敏度高、制造容易等优点而被广泛研究和实践,同时,干涉型传感器也在温度^[22-23]和应变测量方面应用广泛。2014年,Wang等^[24]提出一种基于 Mach-Zehnder 干涉仪和涂覆有 40 nm 厚度钯(Pd)膜的光纤布拉格光栅的氢气传感器,可以同时进行氢气和温度测量,在氢气体积分数为 $0\% \sim 8.0\%$ 时,灵敏度可以达到约 $70 \text{ pm}/\%$ 。基于 Pd 膜的氢气传感器(例如纯 Pd 膜和 Pd/Ni 复合膜)在与氢气反应时,敏感膜的体积会膨胀并且折射率会发生改变,此外,Pd 膜在长期使用过程中,容易开裂,造成测量性能下降。近年来,由于制造简单、可重复使用和易于涂覆,Pt/WO₃ 粉末被广泛用作氢敏感材料。武汉理工大学杨明红团队在该方面做了大量的研究,2015年,Wang等^[25]证明负载有 Pt/WO₃ 涂层的微型光纤尖端法布里-珀罗干涉仪(FPI)可以作为氢气传感器,它具有 $10 \text{ nm}/\%$ 的高灵敏度;2018年,Li等^[26]提出一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)填充空芯光纤(HCF)并负载 Pt/WO₃/SiO₂ 的双 C 型光纤氢气传感器,通过检测干涉光谱的漂移实现对氢气浓度的高灵敏测量。基于干涉型的氢气传感器具有灵敏度高、测量精度高、结构小巧等优点,但是 FPI 型传感器的干涉光谱具有周期性,当需要同时检测多点的氢气浓度时,干涉频谱复杂难以辨别、信号解调困

难,同时信号解调需要昂贵的光谱仪,这给实际测量带来了限制。另外,考虑到氢气泄露可能发生在多个区域,为了在不增加额外检测设备的条件下检测多个位置的氢气浓度,需要可进行多路检测的氢气传感器。但是,目前的 FPI 型传感器多为探针,只能检测一个位置的氢气浓度,无法实现多点同时测量。

在本文中,提出了一种基于阵列波导光栅(AWG)的 PDMS 填充并涂覆有 Pt/WO₃ 的光纤 FPI 型多点测量氢气传感器,该传感器使用两个结构相同的 FPI 作为传感部分,当氢气体积分数从 1.0% 升到 5.0% 时,所提出的单个氢气传感器的氢气灵敏度分别为 $1.77 \text{ nm}/\text{C}$ 和 $2.17 \text{ nm}/\%$,当引入 AWG 后,通过将两个光纤 FPI 型氢气传感器与 AWG 的相应通道连接,可以实现氢气浓度的多点同时测量。同时,本文所提出的氢气传感器的特殊结构还可以有效地保护氢敏材料使其不易脱落,进而保证氢气传感器的长期使用。另外,根据实际测量的需要,该多点测量装置还可以实现更多点氢气浓度的测量,如 16 点、32 点等。

2 氢气传感器的制作

图 1 是所提出的光纤 FPI 型氢气传感器的结构示意图,其中有 3 个反射面: M1(SMF 和空气界面),M2(空气和 PDMS 界面)和 M3(PDMS 和空气界面)。传感器的制作过程:首先,将一小段 HCF 与单模光纤(SMF)熔接,其中,HCF 用光纤切割刀切割成合适的长度,约为 $200 \mu\text{m}$;接着,将 HCF 插入高热膨胀系数、与光纤有良好的粘附性的 PDMS 液体中,利用毛细效应,使得 PDMS 液体进入 HCF,在实验中,为达到更佳的热膨胀效果以得到较高的温度灵敏度,调节固化剂 A 和 B 的比例为 $10:1$;随后,将整段光纤放在加热台上,在 70 C 条件下加热 5 h ,使得 PDMS 形成半交联状态,然后在传感头外侧粘上氢敏材料粉末,光纤外部多余的氢敏材料用乙醇擦除,此处所用的氢敏材料为 Pt/WO₃,由武汉理工大学杨明红团队提供;最后,将整个传感头继续在 70 C 条件下加热 5 h ,使得 PDMS 完全固化,此时氢敏材料将牢牢固定在 PDMS 外表面,这种设计可以有效防止氢敏材料脱落。制作完成的氢气传感器的实物图如图 2 所示,该传感器由一段 SMF 和一段 HCF 组成,进入 HCF 的 PDMS 将空气密封在 SMF 和 HCF 中间,形成空气腔。传感器的一致性在手工制作的过程中很难保

证,但可以通过调整 HCF 的长度和 PDMS 的厚度来提高传感器的一致性,在切割 HCF 的过程中,可用显微镜提高切割精度,PDMS 的厚度可以通过控制浸入 PDMS 液体的时间和从液体中取出的速度来保证。因此,所提出的传感器可以具有较好的一致性。

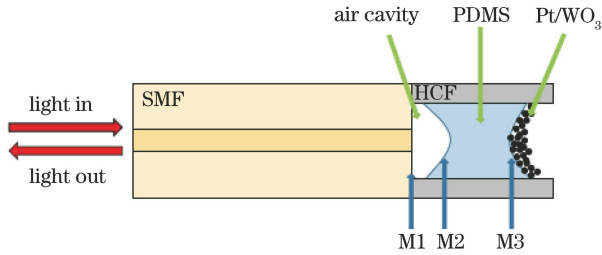


图 1 基于 PDMS 填充的光纤 FPI 型氢气传感器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber FPI hydrogen sensor based on PDMS filling

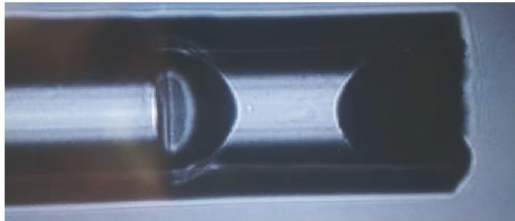


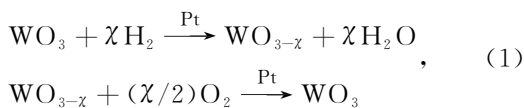
图 2 基于 PDMS 填充的光纤 FPI 型氢气传感器实物图
Fig. 2 Physical image of optical fiber FPI hydrogen sensor based on PDMS filling

3 传感原理分析

3.1 单点法布里-珀罗干涉仪型氢气测量原理

M1 和 M2 之间的空气腔构成一个 FPI,由于 M3 外表面装载了氢敏材料,表面不光滑会影响反射,因此由 M1 和 M3、M2 和 M3 构成的 FPI 对干涉的影响是次要的。

当该传感器暴露在氢气环境中时,涂覆在 PDMS 外表面的氢敏材料与氢气发生氧化还原反应,并在 Pt 的催化作用下放出大量热量,其反应过程可以表示为



化学反应放出的热量使得 PDMS 体积膨胀,从而导致空气腔长缩短。根据相干干涉原理,干涉光的相位将会发生变化。FPI 型传感器的原理可近似看成双光束干涉,其光强值 I 满足

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4\pi nL/\lambda), \quad (2)$$

式中, I_1 、 I_2 为两束反射光的光强, L 为光纤 F-P 腔的腔长, n 为空气折射率, λ 为光波长。

光程差 M 与相位差 φ 可表示为

$$M = 2nL, \quad (3)$$

$$\varphi = 4\pi nL/\lambda, \quad (4)$$

根据(4)式可知,当传感器的相位差 φ 取到 $2m\pi$ (m 为任意整数)时,得到光强为最大值,可表示为

$$\varphi = 4\pi nL/\lambda_d = 2m\pi, \quad (5)$$

式中, λ_d 表示光强最大值所对应的波长,即干涉谱波峰的波长值。将等式变形可得到

$$\lambda_d = 2nL/m, \quad (6)$$

当光谱产生漂移时,中心波长最大值发生变化,变化值可以表示为

$$\Delta\lambda_d = 2n\Delta L/m = \Delta L\lambda_d/L, \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda_d$ 为光谱波长漂移量, ΔL 为 F-P 腔的腔长变化量。

光纤传感器的自由光谱范围(FSR, L_{FSR})体现了两个反射波峰或波谷之间的距离,其与测量光谱单周期的带宽有关,表达式为

$$L_{\text{FSR}} = \lambda^2/2nL, \quad (8)$$

从(8)式可以看出,传感器的腔长越长,则其 FSR 越小,单个周期的波长范围越窄,在相同波段中谐振波的数量越多。因此根据 FSR,可有效地控制 FPI 的腔长。

由于传感器的 F-P 腔的腔长变化量与 PDMS 的膨胀有关,而 PDMS 的膨胀又与化学反应的放热量有关,因此,所提出的氢气传感器的干涉光谱的波长漂移可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{dip}} &= 2n\Delta L/m = (-2nk\Delta T)/m = \\ &(-2nk\xi c)/m = (-k\xi\lambda_{\text{dip}}c)/L, \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ξ 表示单位体积分数氢气发生氧化还原反应所释放的热量所导致的温度变化系数, c 是氢气浓度, n 、 ξ 、 k 都是常数,因此干涉波长随着氢气浓度的增加而线性减少。进而,通过检测传感器的光谱漂移,即可实现对氢气浓度的检测。

3.2 基于阵列波导光栅的多点测量复用原理

对于 AWG 来说,它的滤波图谱是一定的,如图 3(a)所示;然而对于 FPI,它的反射光谱随着氢气浓度的改变而发生漂移,如图 3(b)所示。根据 FPI 在室温下的中心波长与 AWG 的最相近的通道相连原理,从宽带光源发出的光,首先经过 AWG 滤波,分成 16 路具有不同中心波长的光并进入相应的通道,未与 FPI 相连的通道将在端面发生菲涅尔反射并返回 AWG;对于与 FPI 相连的通道,经 AWG 滤波

的光进入 FPI 后,将会在其内部发生反射,反射光将会进入 AWG 并进行滤波。当 FPI 的中心波长与相连的通道完全匹配时,AWG 滤波得到的光强是最大的;当氢气浓度发生改变时,FPI 的干涉光谱发生漂移,与 AWG 的通道重合部分将会减少,此时,经 AWG 再次滤波后,光谱仪检测到的光强将会降低。因此,通过将 FPI 与相应通道相连,可以将传感器的波长漂移转化为光强变化。由于 FPI 的干涉光谱是周期性的正弦函数,因此当下一个干涉波到来

时,随着氢气浓度的变化 AWG 的反射光强将会呈现正弦周期性函数变化,如图 3(c)所示。这意味着,当 FPI 干涉光谱的漂移速度大于本身的 FSR 时,将会导致干涉光谱的误判和难以确定。但是,通过调整空气腔的长度和 PDMS 厚度来制作具有不同 FSR 的传感器,可以满足不同实际场合的应用需求。当需要较大的氢气灵敏度时,可以制作 FSR 小于波长漂移速度的传感器;当测量氢气浓度范围比较大时,可以制作 FSR 大于波长漂移速度的传感器。

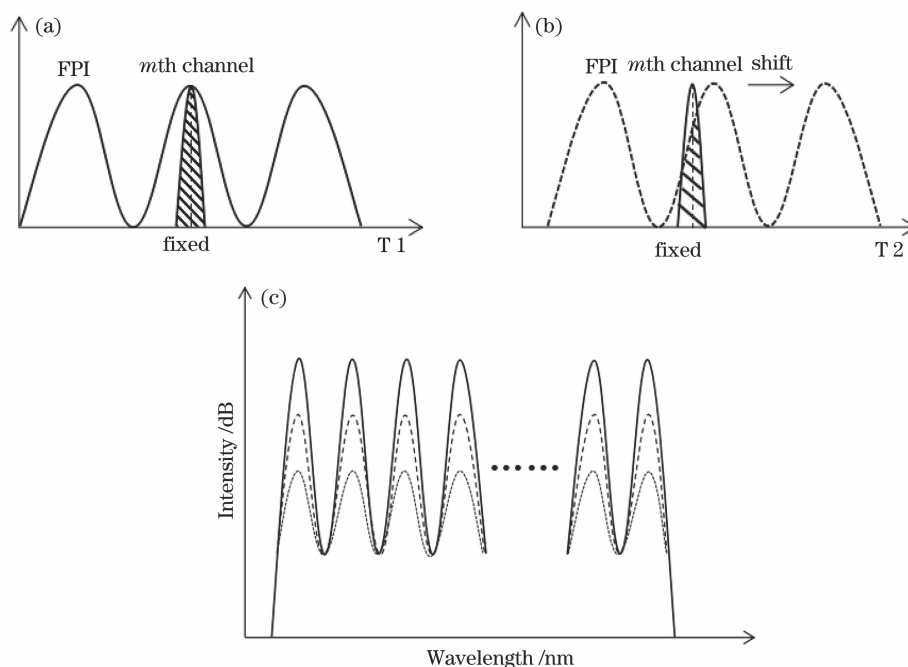


图 3 基于 AWG 的多点测量复用原理图。(a) 当 FPI 完全匹配第 m 个通道;(b) 当 FPI 的光谱随温度变化而变化;
(c) FPI 波长漂移与 AWG 光强之间的关系

Fig. 3 Principle diagram of multi-point measurement multiplexing based on AWG. (a) When FPI completely matches the m th channel; (b) when FPI spectrum changes with temperature; (c) relationship between FPI wavelength shift and AWG intensity

4 实验装置

4.1 单点氢气测量实验装置

图 4 是单点氢气浓度测量装置的示意图。它包括一个具有 200 nm 光谱带宽的宽带光源(BBS)、一个波长分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(OSA)、一个光环行器(OC)、一个氢气发生器(QL-500)、一个气体流量控制器(D08-3F),以及两个气泵和一个气室(1 cm×2 cm)。该气体流量控制器具有两个精度为±0.1%的通道,进而可同时控制空气流量和氢气流量。

4.2 多点氢气测量实验装置

提出的用于多点测量氢气浓度的实验装置如图

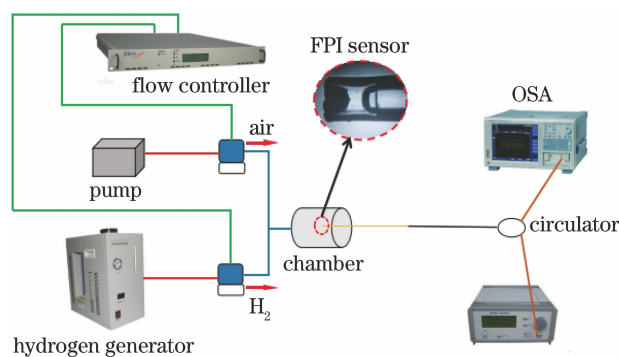


图 4 单点氢气浓度测量的实验装置图

Fig. 4 Experimental device diagram of single-point hydrogen concentration measurement

5 所示。AWG 具有 16 个通道,波长范围为 1532~

1545 nm, 用于多路复用和多路分解 FPI 传感器。根据其中心波长的不同, 选择 16 个通道中的两个分别与两个 FPI 传感器连接, 并通过 OSA 对 AWG 所有通道的反射强度进行监测。氢气气室由两个端口组成, 用于氢气和空气的流入以及流出。使用质量流量控制器调整氢气和空气的体积配比, 可以实现氢气体积浓度的变化。

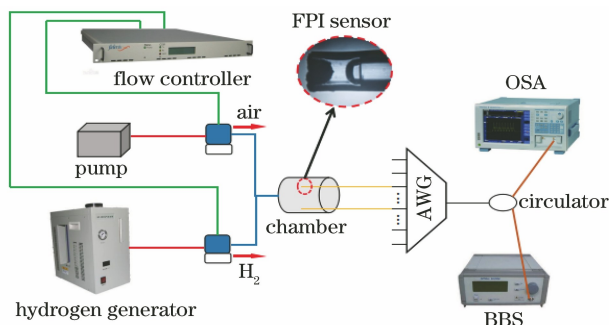


图 5 多点氢气浓度测量的实验装置图

Fig. 5 Experimental device diagram of multi-point hydrogen concentration measurement

5 实验结果分析与讨论

5.1 单点氢气测量实验结果分析

对传感器的温度响应特性进行研究, 分别将两个氢气传感器置于加热台上, 在 30~70 °C 温度下, 以 10 °C 为间隔, 分别记录两个传感器在每个温度下的反射光谱。两个传感器的反射光谱如图 6 所示。在给定的波长范围内, 两个传感器的反射光谱为周期性正弦形, 均有 3 个波峰和 3 个波谷。随着温度的升高, 两个传感器的反射光谱均向短波长方向移动, 当温度从 30 °C 升高到 70 °C 时, 二者的反射光谱分别向左漂移了 28.1 nm 和 43.6 nm。通过对传感器的波长变化和温度变化进行线性拟合, 得到二者的波长和温度的拟合函数分别为 $y = 1586.29 - 0.691x$ 和 $y = 1598.85 - 1.097x$, 即二者的温度灵敏度分别为 0.691 nm/°C 和 1.097 nm/°C, 且有良好的拟合度, 分别为 0.997 和 0.998。两个传感器的波长漂移和温度之间的拟合关系如图 7 所示。

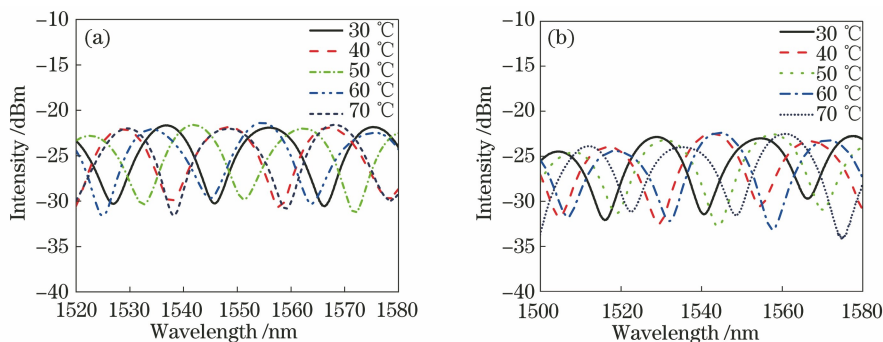


图 6 从 30 °C 到 70 °C 两个传感器的反射光谱。(a) FPI 1; (b) FPI 2

Fig. 6 Reflectance spectra of two sensors from 30 °C to 70 °C. (a) FPI 1; (b) FPI 2

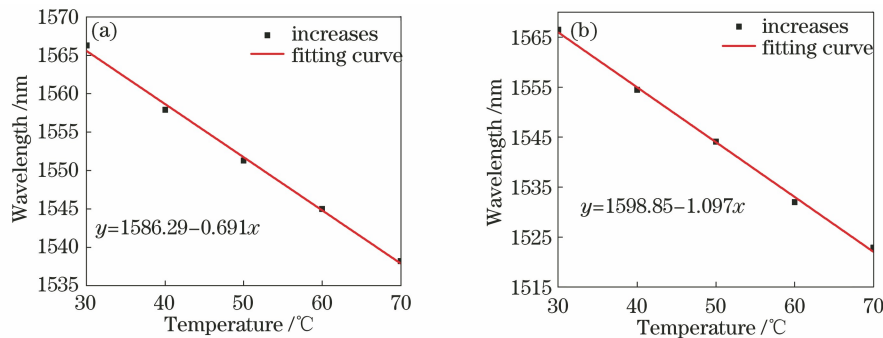


图 7 两个传感器的波长漂移和温度上升之间的关系。(a) FPI 1; (b) FPI 2

Fig. 7 Relationships between wavelength shift of two sensors and temperature increasing.

(a) FPI 1; (b) FPI 2

在测试传感器的氢气响应实验中, 将两个传感器分别置于氢气气室中进行测试。图 8 是两个传感器在氢气体积分数为 1.0%~5.0% 范围内的反射

光谱, 随着氢气体积分数从 1.0% 增加到 5.0%, 传感器的反射光谱向短波长方向分别漂移了 8.8 nm 和 9.7 nm。从图 9 中可以看出, 传感器的波长漂移

与氢气浓度值之间的线性度良好,拟合度分别为 0.969 和 0.977,拟合函数分别为 $y = 1531.26 - 1.77x$ 和 $y = 1544.07 - 2.17x$,说明两个氢气传感器的氢气灵敏度分别为 1.77 nm/% 和

2.17 nm/%。在本课题组的前期工作中,已对该类氢气传感器进行了详细的研究,外表面镀有 Pt/WO₃ 粉末且内填 PDMS 的氢气传感器的响应时间可以达到 23 s,同时具有良好的重复性^[26]。

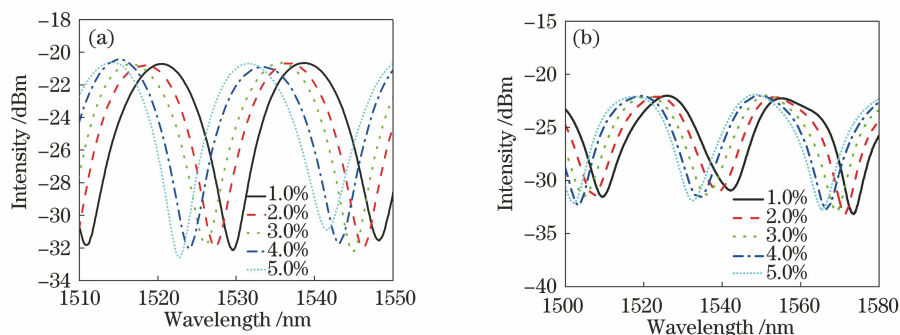


图 8 两个传感器在氢气体积分数 1.0%~5.0% 范围内的反射光谱。(a) FPI 1;(b) FPI 2
Fig. 8 Reflectance spectra of two sensors in hydrogen volume fraction range of 1.0%~5.0%.

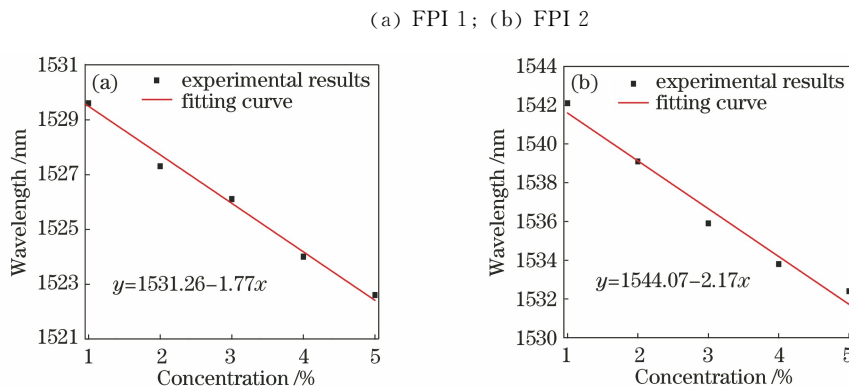


图 9 两个传感器的波长漂移和氢气浓度之间的关系。(a) FPI 1;(b) FPI 2
Fig. 9 Relationships between wavelength shift of two sensors and hydrogen concentration.

5.2 多点氢气测量实验结果分析

对氢气浓度的多点测量进行测试,图 10 显示了所提出的多点测量光纤传感器的反射光谱。选择

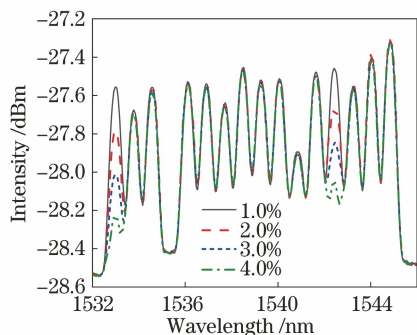


图 10 多点氢气传感器在氢气体积分数 1.0%~4.0% 范围内的反射光谱
Fig. 10 Reflectance spectra of multi-point hydrogen sensor in hydrogen volume fraction range of 1.0%~4.0%

AWG 的第 1、13 个通道分别与 FPI 1 和 FPI 2 相连,作为传感器通道,所测量的氢气体积分数范围为 1.0%~4.0%,根据氢气浓度的变化,在所选的 2 个通道上产生 0.7 dB 的光强损失。在一定的氢气浓度范围内,所选通道的反射强度随氢气浓度的增加而减小。同时,在氢气浓度的改变过程中,未与 FPI 相连的通道的光强保持稳定。

如图 11 所示,相对反射强度与氢气浓度呈线性关系。第 1、第 13 通道的拟合方程分别为 $y = -27.34 - 0.22x$ 和 $y = -27.28 - 0.19x$,得到两个通道的灵敏度分别为 0.22 dB/% 和 0.19 dB/%。实验数据表明,计算结果与拟合曲线吻合较好,两个通道的拟合度分别为 0.999 和 0.994。如果在实际应用中,使用功率分辨率为 0.001 dBm 的光谱仪测量该传感器时,将得到两个通道的氢气传感器的分辨率(氢气体积分数)为 4.54×10^{-7} 和 5.26×10^{-7} 。

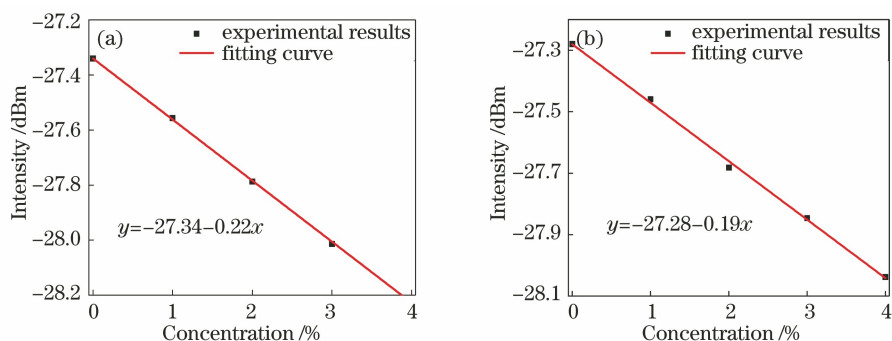


图 11 两个通道的强度变化和氢气浓度之间的关系。(a)第 1 通道;(b)第 13 通道

Fig. 11 Relationships between intensity change of two channels and hydrogen concentration.

(a) The 1st channel; (b) the 13th channel

6 结 论

提出一种基于 AWG 的 PDMS 填充并涂覆有 Pt/WO₃ 的光纤 FPI 型多点测量氢气传感器,该传感器使用两个结构相同的 FPI 作为传感部分,氢敏材料与氢气发生化学反应放热,PDMS 受热膨胀导致空气腔长缩短,从而 FPI 的干涉光谱发生漂移,当氢气体积分数从 1.0% 升到 5.0% 时,所提出的单个氢气传感器的氢气灵敏度分别为 1.77 nm/% 和 2.17 nm/%,当引入 AWG 后,通过将两个光纤 FPI 氢气传感器与 AWG 的相应通道连接,可以实现氢气浓度的多点同时测量,实验结果表明,AWG 的两个通道的灵敏度分别为 0.22 dB/% 和 0.19 dB/%,两个通道的氢气传感器的分辨率(氢气体积分数)为 4.54×10^{-7} 和 5.26×10^{-7} 。该光纤氢气传感器具有结构灵活、选择性好的优点,且可测量的点数依赖于 AWG 的通道数,通过将多个相同的 FPI 与相应通道相连接,可以实现更多点的同时测量,如 32 点、64 点等,且 FPI 的制作成本低廉、易于制作、结构小巧,因此在需要多点测量的场合,该氢气传感器具有明显的优点。

参 考 文 献

- [1] Hosseini S E, Wahid M A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: promising green energy carrier for clean development [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 850-866.
- [2] Bévenot X, Trouillet A, Veillas C, et al. Hydrogen leak detection using an optical fibre sensor for aerospace applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2000, 67(1/2): 57-67.
- [3] Caumon P, Zulueta M L B, Louyrette J, et al. Flexible hydrogen production implementation in the French power system: expected impacts at the French and European levels [J]. *Energy*, 2015, 81: 556-562.
- [4] Schwandt C, Fray D J. Hydrogen sensing in molten aluminium using a commercial electrochemical sensor [J]. *Ionics*, 2000, 6(3/4): 222-229.
- [5] Brungs M P, Mauchausse C, Stroescu D, et al. Evaluation of hydrogen detectors for use in coal mines [EB/OL]. [2021-04-18]. https://www.researchgate.net/publication/279910066_Evaluation_of_hydrogen_detectors_for_use_in_coal_mines.
- [6] de Simon I, Arndt M. Thermal and gas-sensing properties of a micromachined thermal conductivity sensor for the detection of hydrogen in automotive applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 97/98: 104-108.
- [7] Zhang Y N, Peng H J, Qian X L, et al. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 244: 393-416.
- [8] Hübert T, Boon-Brett L, Black G, et al. Hydrogen sensors: a review [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 157(2): 329-352.
- [9] Villatoro J, Díez A, Cruz J L, et al. Highly sensitive optical hydrogen sensor using circular Pd-coated singlemode tapered fibre [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(16): 1011-1012.
- [10] Bévenot X, Trouillet A, Veillas C, et al. Hydrogen leak detection using an optical fibre sensor for aerospace applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2000, 67(1/2): 57-67.
- [11] Yang M H, Sun Y, Zhang D S, et al. Using Pd/WO₃ composite thin films as sensing materials for optical fiber hydrogen sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 143(2): 750-753.
- [12] Zhou X, Yang M, Zhang W, et al. Fiber hydrogen sensor coated with Pt-WO₃ film based on

- femtosecond laser micro-processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1210001.
- 周贤, 杨沫, 张文, 等. 基于飞秒激光微加工的 Pt-WO₃ 膜光纤氢气传感器 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1210001.
- [13] Dai J X, Zhu L, Wang G P, et al. Optical fiber grating hydrogen sensors: a review [J]. Sensors, 2017, 17(3): 577.
- [14] Hong W L, Zhao C L, Xu R, et al. Optical fiber Bragg grating hydrogen sensor coated with mesoporous Pt/WO₃ film [J/OL]. Optical communication technology: 1-7. [2021-04-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20210325.1309.002.html>.
- 洪婉玲, 赵春柳, 徐睿, 等. 涂覆介孔型 Pt/WO₃ 膜的光纤布喇格光栅氢气传感器 [J/OL]. 光通信: 1-7. [2021-04-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20210325.1309.002.html>.
- [15] Zhou X, Dai Y T, Karanja J M, et al. Microstructured FBG hydrogen sensor based on Pt-loaded WO₃ [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8777-8786.
- [16] Li Y N, Zhao C L, Xu B, et al. Optical cascaded Fabry-Perot interferometer hydrogen sensor based on vernier effect [J]. Optics Communications, 2018, 414: 166-171.
- [17] Xu B, Zhao C L, Yang F, et al. Sagnac interferometer hydrogen sensor based on panda fiber with Pt-loaded WO₃/SiO₂ coating [J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1594-1597.
- [18] Kim Y H, Kim M J, Rho B S, et al. Mach-Zehnder interferometric hydrogen sensor based on a single mode fiber having core structure modification at two sections [C] // 2010 IEEE Sensors, November 1-4, 2010, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1483-1486.
- [19] Bévenot X, Trouillet A, Veillas C, et al. Surface plasmon resonance hydrogen sensor using an optical fibre [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(1): 118-124.
- [20] Perrotton C, Javahiry N, Slaman M, et al. Fiber optic surface plasmon resonance sensor based on wavelength modulation for hydrogen sensing [J]. Optics Express, 2011, 19(106): A1175-A1183.
- [21] Wang X G, Tang Y K, de Zhou C, et al. Design and optimization of the optical fiber surface plasmon resonance hydrogen sensor based on wavelength modulation [J]. Optics Communications, 2013, 298/299: 88-94.
- [22] Chen Y F, Wan H D, Chen Q, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0110001.
- 陈彧芳, 万洪丹, 陈乾, 等. 基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0110001.
- [23] Meng H, Li H Y, Cao Z Q. An optical fiber Farby-Perot temperature sensor for rapid ocean temperature measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1210001.
- 孟华, 李海洋, 曹占启. 一种用于海洋温度快速测量的光纤法布里-珀罗温度传感器 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1210001.
- [24] Wang M, Wang D N, Yang M H, et al. In-line Mach-Zehnder interferometer and FBG with Pd film for simultaneous hydrogen and temperature detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 202: 893-896.
- [25] Wang Y, Yang M H, Zhang G L, et al. Fiber optic hydrogen sensor based on Fabry-Perot interferometer coated with Sol-Gel Pt/WO₃ coating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2530-2534.
- [26] Li Y N, Shen W M, Zhao C L, et al. Optical hydrogen sensor based on PDMS-formed double-C type cavities with embedded Pt-loaded WO₃/SiO₂ [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 276: 23-30.