

激光与光电子学进展

基于镀钯微悬臂梁探针的光纤氢气传感器

张莉超¹, 黄嘉斌², 徐磊³, 王义平², 廖常锐^{2*}¹深圳信息职业技术学院智能制造与装备学院, 广东 深圳 518172;²深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室深圳市超快激光微纳制造重点实验室, 广东 深圳 518060;³深圳职业技术大学电子与通信工程学院, 广东 深圳 518055

摘要 为了快速检测氢气泄漏, 迫切需要开发一种更安全、浓度检测下限更低的氢气传感器。将镀有钯膜的微悬臂梁探针与单模光纤端面进行组装, 设计了一种易制备且低成本的光纤氢气传感器。实验结果表明, 该传感器具有超高的氢气响应灵敏度, 约为 $-9.887 \mu\text{m}/\%$, 同时具有低至 $1.76 \times 10^{-3}\%$ 的超低检测下限和优异的重复性。在痕量氢气体积分数条件下, 该传感器对氢气体积分数表现出优异的线性响应, 这对痕量气体检测具有重要意义, 使其在氢能源电池、核电站和太空探索中具有重要的应用价值。

关键词 光纤传感器; 氢气检测; 微悬臂梁; 钯膜

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232225

Optical Fiber Hydrogen Sensor Based on Pd-Coated Microcantilever

Zhang Lichao¹, Huang Jiabin², Xu Lei³, Wang Yiping², Liao Changrui^{2*}¹School of Intelligent Manufacturing and Equipment, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, Guangdong, China;²Shenzhen Key Laboratory of Ultrafast Laser Micro/Nano Manufacturing, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education/Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;³School of Electronic and Communication Engineering, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract In order to quickly detect hydrogen leaks, there is an urgent need to develop a safer and lower concentration detection lower limit hydrogen sensor. This article assembles a micro cantilever beam probe coated with palladium film with a single-mode fiber end face, and designs an easy to prepare and low-cost fiber optic hydrogen sensor. The experimental results show that the sensor has an ultra-high hydrogen response sensitivity of about $-9.887 \mu\text{m}/\%$, while also having an ultra-low detection lower limit as low as $1.76 \times 10^{-3}\%$ and excellent repeatability. Under the conditions of trace hydrogen volume fraction, the sensor exhibits excellent linear response to hydrogen volume fraction, which is of great significance for trace gas detection and has important application value in hydrogen energy batteries, nuclear power plants, and space exploration.

Key words optical fiber sensor; hydrogen detection; microcantilever; palladium coating

1 引言

氢气是一种高质量的能源载体,它具有高效、高

还原性和可储存性,在新能源、航空航天、电子、医疗等领域有着广泛的应用。然而,在室温和标准大气压下,当氢气的体积分数达到 $4\% \sim 74.2\%$ 的爆炸极限时^[1],

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-11-15; 录用日期: 2023-11-27; 网络首发日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(62101353, 62122057)、中国博士后基金项目(2018M643164)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2022B1515120061)、深圳市科技计划项目(RCYX20200714114524139, 深圳市超快激光微纳制造重点实验室 ZD-SYS20220606100405013, JCYJ20190808161019406)

通信作者: *cliao@szu.edu.cn

氢气在空气中具有极其易燃和爆炸的特性,这使其在使用和储存过程中存在重大安全隐患。因此,开发一种高度灵敏和可靠的氢气传感器,特别是用于超低浓度检测以实时监测氢气泄漏,是非常重要的。

近几十年来,科研工作者已经研究了基于电化学、微机电、电阻和光学机制等类型的氢气传感器^[2-15]。其中,电阻、电化学和微机电传感器均使用电信号解调,然而在电信号读出过程中存在触发电火花的潜在风险^[3, 5, 14]。相比之下,光学传感器尤其是光纤传感器^[16-18],仅使用敏感材料和光信号来检测氢气,其探头是一种无源器件,不会产生火花,检测过程非常安全可靠。目前报道的光纤氢气传感器结构有干涉结构^[6, 8]、光纤布拉格光栅结构^[11, 19]、表面等离子共振结构^[20]和倏逝场结构^[21]等,其中:典型的光纤干涉结构如法布里-珀罗(FP)干涉和光纤光栅结构由于受光纤刚度限制,检测灵敏度通常较低,一般在数十 pm/%量级;表面等离子共振结构制备工艺和过程较为复杂;倏逝场结构一般需要对光纤进行拉锥从而稳定性不佳。近几年,为了满足对高灵敏度、高可靠性和高精度氢气传感器的需求,研究人员提出了基于聚合物微悬臂梁的光纤传感器结构,其中悬臂梁通过飞秒激光诱导双光子聚合而得^[22-25]。然而,由于聚合物材料具有比较高的热膨胀系数,这种双光子聚合悬臂梁表现出明显的温度串扰;此外,双光子聚合工艺复杂,需要昂贵的设备。因此,迫切需要开发一种制备成本低、工艺简单且灵敏度高的光纤氢气传感器。

本文使用亚微米厚度的氮化硅悬臂梁代替双光子聚合悬臂梁,并将其与单模光纤(SMF)进行组装。为了增强该传感器对氢气的敏感性,通过磁控溅射方式在 0.55 μm 厚的悬臂梁上镀一层约 24 nm 厚的钯(Pd)膜。研究发现:当氢气体积分数从 0% 上升到 0.2% 时,此传感器具有超高的灵敏度(-9.887 $\mu\text{m}/\%$)和超低的探测下限(1.76 $\times 10^{-3}\%$);同时,该传感器表现出优异的可重复性并具有相对快速的响应时间。这使其在痕量气体检测方面具有重要的应用价值。

2 光纤端面集成微悬臂梁结构传感原理

本文所设计传感器的三维(3D)结构示意图如图 1(a)所示,微悬臂梁探针和光纤均被固定在一个支撑柱上。微悬臂梁探针尖端和光纤端面形成 FP 腔,其中,从探针表面反射的光与从光纤端面反射的光相互干涉,如图 1(b)所示。由于微悬臂梁对氢气不敏感,因此将其作为结构层,微悬臂梁的上表面需要涂覆一层对氢敏感的材料作为敏感层。考虑到金属 Pd 有能力吸收 900 倍于其体积的氢,本文选用 Pd 作为敏感层材料。在氢气环境中, Pd 膜表面会吸附并离解氢原子,新形成的原子迅速扩散到 Pd 膜内部形成 PdH_x,直

到达到吸附和离解之间的平衡。PdH_x 的形成会导致 Pd 晶格常数增加,这在宏观上表现为体积膨胀。在静态应力检测模型中,当敏感层吸收分析物并膨胀时,结构层和敏感层之间的应力差会导致悬臂梁弯曲。结合商用微悬臂梁的低弹簧常数(K)和光学干涉读出高灵敏度的优点,可以将吸收氢气引起的悬臂梁的弯曲转化为 FP 腔长的变化,即 FP 腔长从 L_1 变为 L_2 ,如图 1(b)所示。FP 腔长的变化使腔中的光程差发生变化,干涉条纹也随之发生变化。根据 Sieverts 定律, Pd 膜内部氢原子的平衡浓度与氢分子分压的平方根成正比^[4],因此,悬臂的偏转可以准确地指示环境中的氢浓度。此外,这种氢吸收是完全可逆的,无氢环境中, Pd 膜会释放氢原子,最终使弯曲的悬臂梁恢复到原来的状态。

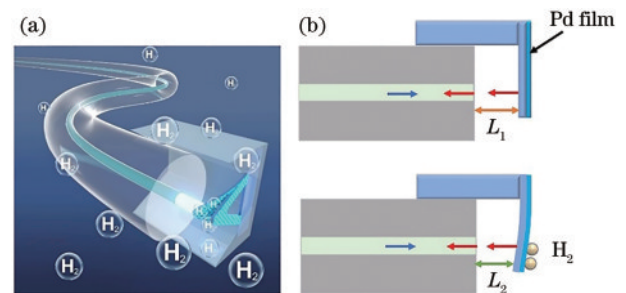


图 1 基于镀钯微悬臂梁探针的光纤氢气传感器的结构示意图。(a) 3D 示意图;(b) 2D 示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of the optical fiber hydrogen sensor based on a Pd-coated microcantilever. (a) 3D image; (b) 2D image

3 实验结果与讨论

3.1 Pd 膜的制备

本文使用的是商用微悬臂梁探针(NP-O10, Bruker;材质为氮化硅,厚度为 0.55 μm ,长度为 115 μm ,弹簧常数 $K=0.06$)。通过磁控溅射(40 mA, 297 V, 11 W)的方法,在微悬臂梁探针的上表面涂覆 Pd 膜,以增强其对氢气的敏感性。为了提高 Pd 膜的均匀性,放置样品时将悬臂梁的表面垂直于 Pd 靶材的溅射方向。在磁控溅射过程中, Pd 膜同时沉积在悬臂梁和载玻片上,可以通过改变溅射时间来获得不同的 Pd 膜厚度。图 2(a)和(b)分别显示的是溅射时间为 3 min 和 6 min 时,利用白光干涉仪测量的载玻片上 Pd 膜的厚度。结果显示,溅射 6 min 的 Pd 膜厚度(24 nm)明显大于溅射 3 min 的膜厚度(14 nm),前者的厚度约为后者的两倍,这表明磁控溅射过程比较稳定可控,沉积速率约为 4 nm/min。根据文献[23], Pd 膜厚度对氢敏感性有显著影响, Pd 膜越厚,灵敏度越高,可见, Pd 膜厚度为 24 nm 的悬臂梁对氢气具有更高的灵敏度。此外,测量 Pd 膜厚度时发现波动相对严重,这主要是由载玻片表面不均匀引起的。

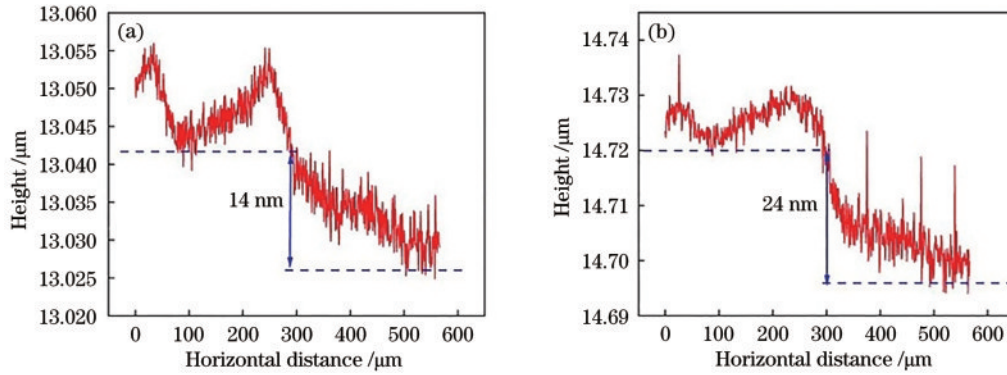


图2 不同溅射时间下利用白光干涉仪测量的Pd膜厚度。(a)溅射3 min(14 nm);(b)溅射6 min(24 nm)

Fig. 2 Measurement of Pd film thickness using a white light interferometer after different sputtering time. (a) Sputtering for 3 min (14 nm); (b) sputtering for 6 min (24 nm)

3.2 微悬臂梁传感器的制备

本工作选用长飞公司的单模光纤(型号为G652D),光纤端面集成微悬臂梁的制备过程如下:1)使用光纤切割机预切割SMF以获得平整的光纤端面,然后将其封装在定制亚克力柱的凹槽中,以确保SMF能够保持直立。2)将悬臂梁固定在亚克力柱的上表面,在显微镜下利用微操作手将悬臂梁与光纤端面对准,通过检测干涉光谱来控制光纤端面与悬臂梁的距离。3)使用紫外固化胶分别对SMF和悬臂梁进行加固,以防止位移。

在制备过程中,利用光谱分析仪接收从传感模块反射的光,利用显微镜将悬臂梁的尖端中心与SMF的中心对准,确保偏移量不应超过10 μm,从而形成FP干涉。FP干涉的腔长是传感器性能的重要因素,为了获得高对比度的干涉光谱,同时提高传感器的灵敏度,本结构中将FP腔长设计为50 μm。自由光谱范围

(FSR)公式为

$$R_{\text{FSR}} = |\lambda_{m+1} - \lambda_m| = \frac{\lambda_{m+1}\lambda_m}{2nL}, \quad (1)$$

式中: n 是FP腔中空气的折射率($n=1$);FSR是空气中两个相邻干涉能级共振波长(λ_m 和 λ_{m+1})之间的差。

利用扫描电子显微镜对不同视角下光纤端面集成微悬臂梁的表面形貌进行了表征,图3(a)为45°视图,图3(b)为俯视图,图3(c)为侧视图,三个视角均显示悬臂梁尖端与光纤中心对齐。另外:由图3(a)、(b)可见,悬臂梁表面和光纤端面较为平整光滑,这有助于增加反射光的强度;由图3(c)可见,悬臂梁与光纤端面之间具有良好的平行度,这为该传感器检测氢气时的高灵敏度及可重复性提供了保障。根据图3(c)测得光纤端面与悬臂梁表面的距离约为50 μm,这与设计的FP长度基本一致,表明光纤端面集成微悬臂梁的制备过程可控。

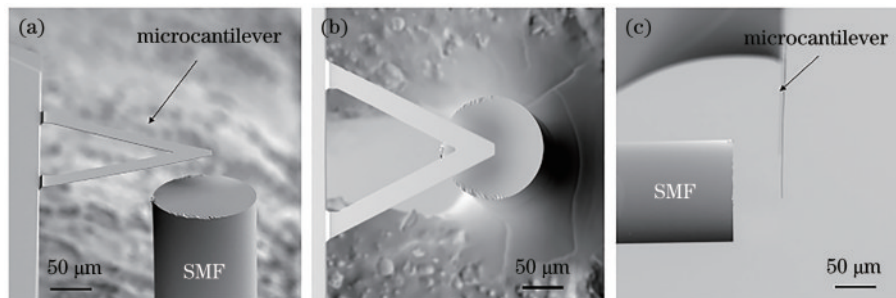


图3 从不同角度观察光纤端面集成微悬臂梁的扫描电子显微镜图像。(a) 45°视图;(b)俯视图;(c)侧视图(圆柱体是单模光纤,三角形结构是微悬臂梁)

Fig. 3 Scanning electron microscopy images of integrated microcantilever on the fiber end face viewed from different angles. (a) 45° view; (b) top view; (c) side view (cylinder is an SMF and the triangular structure is the microcantilever)

3.3 氢气传感实验

氢气传感实验系统描述见文献[22]。将传感器插入直径为500 μm的通道中,氢气发生器产生的氢气通过微通道塑料管与氮气混合,使用两个流量计(D07,北京七星华创流量计有限公司,北京)控制气体混合物中的氢气体积分数,利用宽带光源和光谱分析仪实时

监测反射光谱。图4(a)~(f)分别为23.5 °C温度下,当氢气体积分数在0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、4.0%时,Pd膜厚度为24 nm(T_1)的传感器的反射光谱。根据式(1),由各氢气体积分数下光谱的FSR值,可以反推得到对应氢气体积分数下FP腔的腔长。Pd膜厚度为24 nm和14 nm(T_2)时,FP腔长与氢气体积

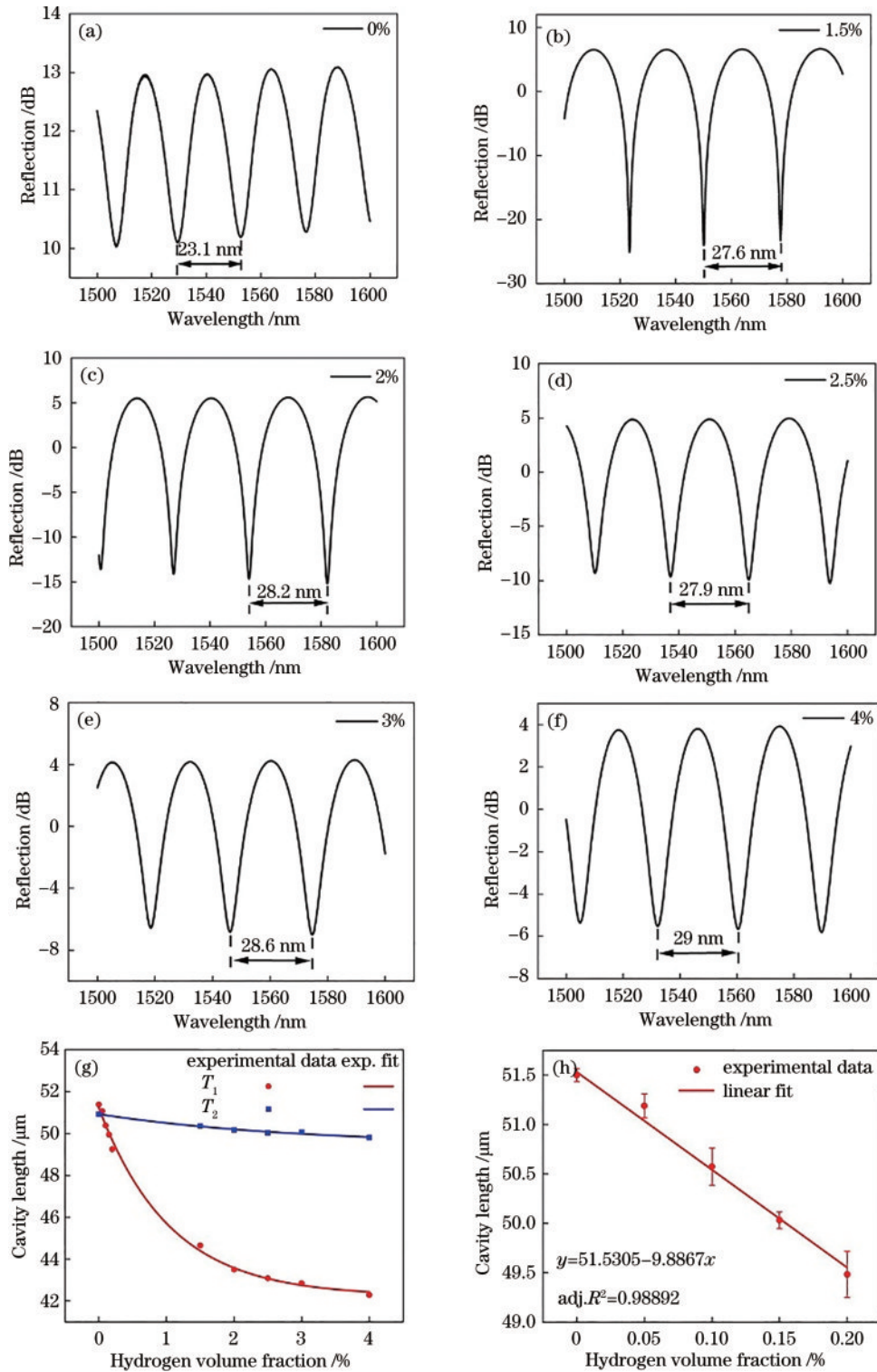


图 4 实验结果。(a)~(f)Pd膜厚度为 24 nm 时,传感器的反射光谱随氢气体积分数的变化关系;(g)不同 Pd 膜厚度时微悬臂梁传感器灵敏度的比较 (T_1 :Pd 膜厚度为 24 nm。 T_2 :Pd 膜厚度为 14 nm。两条线均由指数函数拟合而得);(h)氢气体积分数从 0 变化至 0.2% 时对应腔长的变化关系(通过点的直线由线性函数拟合而得,斜率取小数点后三位)

Fig. 4 Experimental results. (a)–(f) Relationship between the reflection spectrum of the sensor and the volume fraction of hydrogen when the Pd film thickness is 24 nm; (g) comparison of the sensitivities of microcantilever sensors with different Pd film thicknesses (T_1 :24 nm Pd film thickness. T_2 :14 nm Pd film thickness. The lines through the points represent fittings with an exponential function); (h) variation relationship of corresponding chamber length when hydrogen volume fraction changes from 0 to 0.2%

分数的关系如图 4(g)所示。下面较陡峭的线和圆点代表厚度 T_1 微悬臂梁传感器的腔长变化,上面较平缓

的线和矩形点代表 Pd 膜厚度为 14 nm (T_2) 的传感器的腔长变化。由图可见,氢气体积分数在 0%~4.0% 变

化时,两种厚度的 FP 腔长均为氢气体积分数的非线性函数。由于不同的氢气体积分数会引起悬臂梁不同程度的弯曲,从而相应地改变腔长,因此可以根据腔长的变化来计算氢气体积分数。此外, T_1 厚度传感器的腔长变化明显大于 T_2 厚度传感器的变化,因此,随后的测量实验使用 T_1 厚度的悬臂梁传感器。需要注意的是,传感器的灵敏度随着氢气体积分数的降低而增加。图 4(h)显示了氢气体积分数在 0%~0.2% 变化时,FP 腔长与氢气体积分数的关系,可见,当氢气体积分数相对较低时,腔长近似为氢气体积分数的线性函数,此线性函数的斜率即为传感器的灵敏度,若斜率取小数点后三位,可得灵敏度约为 $-9.887 \mu\text{m}/\%$ 。因此,本文设计的传感器可以用于检测氢气体积分数的微小变化。

检测下限(DL)是评估传感器性能的重要指标,定义为谐振波长和灵敏度的最小可检测变化^[25]。DL 的

表达式为 $L_{DL}=R/S$,其中 R 和 S 分别代表传感器的分辨率和灵敏度。根据公式 $\Delta\lambda/\lambda=\Delta L/L$,可以由腔长的灵敏度计算 1558 nm 处干涉波谷波长的灵敏度 S 。另外,利用单个噪声方差 σ 可近似求解分辨率 $R(R=3\sigma)$,其中 σ ^[26]表示为

$$\sigma \approx \Delta\lambda_F / 4.5 (R_{SNR}^{0.25}), \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_F$ 是条纹的半峰全宽(FWHM); R_{SNR} 是信噪比。该传感器的 FWHM 约为 14.1 nm,灵敏度 S 约为 300 nm/%,当 SNR 为 50 dB,可计算得到 DL 值为 $1.76 \times 10^{-3}\%$ 。

传感器的可重复性通过三个循环的氢气体积分数测试进行评估,如图 5(a)所示。无论氢气体积分数增加或减少,腔长变化保持相对稳定,表明传感器具有较好的重复性。多次测试之间仍存在微小的误差,这可能是氢气和氮气混合不均匀导致的。

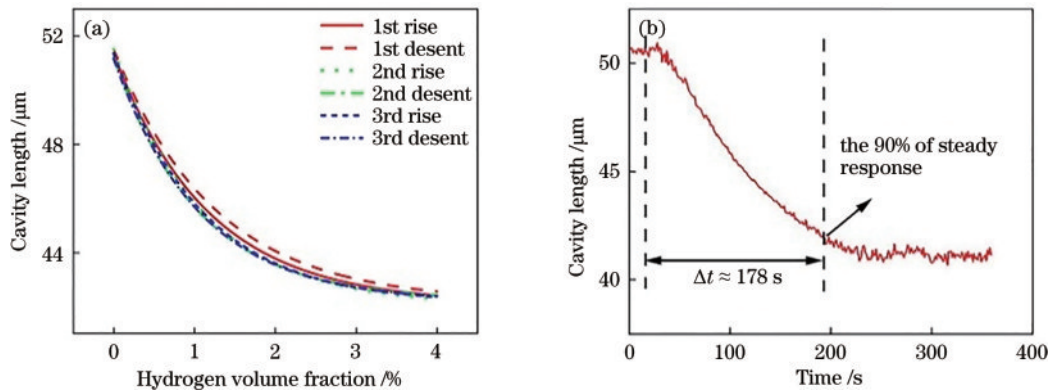


图 5 实验结果。(a)不同氢气体积分数下传感器的重复性测试;(b)氢气体积分数 4.0% 时传感器的响应时间

Fig. 5 Experimental results. (a) Sensor repeatability testing under different hydrogen volume fractions; (b) sensor response time at hydrogen volume fraction of 4.0%

本文还研究了光纤氢气传感器的时间响应。该传感器首先被放置在没有氢气的环境中,当光谱稳定后,引入体积分数为 4% 的氢气,光谱开始漂移;同时,在 50 Hz 的采样频率下记录光谱随时间的变化,使用光谱变化来解调腔长随时间的变化。响应时间即传感器达到 90% 稳态响应所需的时间间隔,在 4% 的氢气体积分数下,传感器响应时间约为 178 s,如图 5(b)所示。根据之前的研究报道^[22],响应时间与氢气体积分数有关,随着氢气体积分数增加,响应时间减少。Matelon 等^[27]报道的响应时间也强烈依赖于所使用的基材质

料,Pd/Si 的响应时间为 700 s,Pd/Al₂O₃ 的响应时间则为 3700 s。他们认为这种差异是由基底粗糙度不同引起的,从而导致 Pd 亚表面微观结构的改变。由此推断,通过选择合适的微悬臂梁材料可以改变传感器的响应时间。

表 1 比较了不同结构的光纤传感器在检测下限和响应时间方面的性能。结果表明,在响应时间相当或更快的情况下,本文提出的光纤微悬臂梁传感器的检测下限远低于其他光纤传感器(如光纤布拉格光栅、长周期光纤光栅、光纤干涉仪和表面等离子体共振结构

表 1 不同结构光纤传感器的检测下限性能比较

Table 1 Comparison of detection lower limit performance of fiber optic sensors with different structures

Sensor structure	Pd thickness	Detection limit / %	Response time at 4% H ₂	Ref.
Fiber Bragg grating	300 μm	1.25×10^{-2}	Few days	[28]
Long-period fiber grating	40 nm	2.7×10^{-2}	Inferior to 42 s (1% H ₂)	[29]
Mach-Zehnder interferometer	10 μm	10^{-4}	180 s	[30]
Bridge configuration	125 μm	10^{-2}	Few days	[9]
Surface plasma resonance	2.5 nm	0.5	3 s	[20]
Fiber-tip microcantilever	24 nm	1.76×10^{-3}	178 s	Proposed

等)。超低的检测下限使得传感器能够检测出痕量气体,从而监测氢气的微小变化。

4 结 论

本文将商业微悬臂梁探针与单模光纤端面集成,设计了一种高性能的光纤氢气传感器。选用的商用悬臂梁厚度为亚微米,弹性系数较低,可以显著提高氢气敏感性,同时,在微悬臂梁表面镀一层 Pd 膜可以进一步提高氢气敏感性。结果表明,该氢气传感器的灵敏度高达 $-9.887 \mu\text{m}/\%$,检测下限低至 $1.76 \times 10^{-3}\%$,且具有良好的重复性和相对较短的响应时间。与双光子聚合微悬臂梁光纤传感器相比,它具有制作工艺简单、成本低、无温度串扰等优点,这种高敏感性的氢气传感器可满足痕量氢气检测的需求,在氢能源电池、航空航天、核电站和深空探测等方面具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 许琰玮,刘永智. 光纤氢气传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(7): 27-31.
Xu Y W, Liu Y Z. Researching progress in optical fiber hydrogen sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(7): 27-31.
- [2] Zhang X B, Xiong J B, Gu F, et al. Fabrication and sensing characteristics of intrinsic Fabry-Perot interferometers in fiber tapers[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(12): 120602.
- [3] Chauhan P S, Bhattacharya S. Hydrogen gas sensing methods, materials, and approach to achieve parts per billion level detection: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(47): 26076-26099.
- [4] Li H F, Li Y H, Wang K, et al. Ultra-high sensitive micro-chemo-mechanical hydrogen sensor integrated by palladium-based driver and high-performance piezoresistor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (1): 1434-1445.
- [5] Maksymov I S, Kostylev M. Magneto-electronic hydrogen gas sensors: a critical review[J]. Chemosensors, 2022, 10(2): 49.
- [6] Ma J, Zhou Y L, Bai X, et al. High-sensitivity and fast-response fiber-tip Fabry-Pérot hydrogen sensor with suspended palladium-decorated graphene[J]. Nanoscale, 2019, 11(34): 15821-15827.
- [7] Iannuzzi D, Slaman M, Rector J H, et al. A fiber-top cantilever for hydrogen detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 121(2): 706-708.
- [8] Wang M, Yang M H, Cheng J, et al. Femtosecond laser fabricated micro Mach-Zehnder interferometer with Pd film as sensing materials for hydrogen sensing[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1940-1942.
- [9] Javahiraly N. Review on hydrogen leak detection: comparison between fiber optic sensors based on different designs with palladium[J]. Optical Engineering, 2015, 54 (3): 030901.
- [10] Antman Y, Clain A, London Y, et al. Optomechanical sensing of liquids outside standard fibers using forward stimulated Brillouin scattering[J]. Optica, 2016, 3(5): 510-516.
- [11] Dai J X, Zhu L, Wang G P, et al. Optical fiber grating hydrogen sensors: a review[J]. Sensors, 2017, 17(3): 577.
- [12] 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.
- [13] Ma C, Wang A B. Optical fiber tip acoustic resonator for hydrogen sensing[J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 2043-2045.
- [14] Hübert T, Boon-Brett L, Black G, et al. Hydrogen sensors-a review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 157(2): 329-352.
- [15] 周贤,杨沫,张文,等. 纳米棒 Pt-WO₃微结构光纤氢气传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211405.
Zhou X, Yang M, Zhang W, et al. Micro-structured fiber hydrogen sensor based on nanorod Pt-WO₃[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211405.
- [16] 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.
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.
- [17] 李嘉丽,洪婉玲,赵春柳,等. 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[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306013.
Li J L, Hong W L, Zhao C L, et al. Multi-point optical fiber hydrogen sensor with Fabry-Perot interferometers using arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306013.
- [18] 丁晖,郭茂森,徐浩东,等. 基于钼修饰六方氮化硼的光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 2228001.
Ding H, Guo M S, Xu H D, et al. Fiber-optic hydrogen sensor based on palladium-modified hexagonal boron nitride[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(22): 2228001.
- [19] 辛鑫,吴永武,刘慧敏,等. 一种新的光纤 Bragg 光栅氢气传感器制作方法[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0406002.
Xin X, Wu Y W, Liu H M, et al. A new fabrication method of fiber Bragg grating hydrogen sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0406002.
- [20] Perrotton C, Westerwaal R J, Javahiraly N, et al. A reliable, sensitive and fast optical fiber hydrogen sensor based on surface plasmon resonance[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 382-390.
- [21] 赵羽,刘永智. 具有消逝场结构的光纤氢气传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(11): 61-65.
Zhao Y, Liu Y Z. Fiber-optic evanescent-field hydrogen gas sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(11): 61-65.
- [22] Xiong C, Zhou J T, Liao C R, et al. Fiber-tip polymer microcantilever for fast and highly sensitive hydrogen measurement[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(29): 33163-33172.
- [23] Liao C R, Xiong C, Zhao J L, et al. Design and realization of 3D printed fiber-tip microcantilever probes

- applied to hydrogen sensing[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 5.
- [24] Zou M Q, Liao C R, Chen Y P, et al. 3D printed fiber-optic nanomechanical bioprobe[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(1): 015005.
- [25] Zou M Q, Liao C R, Liu S, et al. Fiber-tip polymer clamped-beam probe for high-sensitivity nanoforce measurements[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 171.
- [26] White I M, Fan X D. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1020-1028.
- [27] Matelon R J, Avila J I, Volkmann U G, et al. Substrate effect on the optical response of thin palladium films exposed to hydrogen gas[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(21): 7797-7801.
- [28] Maier R J, Jones B S, Barton J S, et al. Fibre optics in palladium-based hydrogen sensing[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, 9(6): S45-S59.
- [29] Trouillet A, Marin E, Veillas C. Fibre gratings for hydrogen sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(5): 1124-1128.
- [30] Butler M A. Optical fiber hydrogen sensor[J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 45(10): 1007-1009.