

基于 PDMS 水滴型光纤挥发性有机化合物传感器

武洁雅, 康娟, 董洁, 龚华平, 徐贲, 赵春柳*

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 提出了一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)的水滴型光纤挥发性有机化合物(VOC)传感器,用于检测 VOC 的泄漏。该传感器由一段标准单模光纤弯曲形成,其形状类似水滴,封装在 PDMS 中。实验通过监测传感器输出光谱的波长漂移情况来实现对 VOC 浓度的检测。实验结果表明:当 PDMS 吸收 VOC 时,体积膨胀,水滴型光纤结构的有效弯曲长度减小,在 VOC 体积分数为 $0\sim 9960 \times 10^{-6}$ 范围内,输出光谱发生蓝移,其灵敏度为 $-0.542 \text{ pm}/10^{-6}$,检测精度为 37×10^{-6} ,响应时间为 8.3 min;当采用强度解调方法时,1539.00 nm 波长处的灵敏度最大($-3.22 \times 10^{-4} \text{ dB}/10^{-6}$),检测精度为 31×10^{-6} 。

关键词 传感器;挥发性有机化合物传感器;水滴型光纤结构;回音壁模式;聚二甲基硅氧烷

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2128001

Droplet-Type Optical Fiber Volatile Organic Compound Sensor Based on PDMS

Wu Jieya, Kang Juan, Dong Jie, Gong Huaping, Xu Ben, Zhao Chunliu*

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

Abstract A droplet-type optical fiber volatile organic compound (VOC) sensor based on polydimethylsiloxane (PDMS) is proposed to detect the leakage of VOCs. The droplet-type sensor is formed from a standard single-mode optical fiber that is bent and encapsulated in PDMS. In the experiment, the concentration of the VOC is obtained by monitoring the wavelength drift of output spectrum of the sensor. The experimental results show that when PDMS absorbs the VOC, its volume expands, and the effective bending length of the droplet-type optical fiber structure decreases. The output spectrum of the sensor is blue-shifted when the volume fraction of the VOC ranges from 0 to 9960×10^{-6} . The sensitivity and detection accuracy of the sensor are $-0.542 \text{ pm}/10^{-6}$ and 37×10^{-6} , respectively, with a response time of 8.3 min. When the intensity demodulation method is adopted, the sensitivity of the sensor is the highest ($-3.22 \times 10^{-4} \text{ dB}/10^{-6}$) at the wavelength of 1539.00 nm, and its detection accuracy is 31×10^{-6} .

Key words sensors; volatile organic compound sensor; droplet-type optical fiber structure; whispering gallery mode; polydimethylsiloxane

1 引言

挥发性有机化合物(VOC)的沸点一般在 $50\sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,并且在正常环境状态下极易挥发,这种挥发性气体不仅会造成环境污染,也会严重损害人体健康^[1]。检测 VOC 的常用方法有质谱法^[2-3]和气相色谱法^[4-5],这些方法可实现对 VOC 的高精度和高分辨率测量,但存在检测周期较长、检测成本高昂和监测气体的浓度范围有限(仅能满足于实验室和科研机构对

气体检测的需求)的缺点。

光纤传感器已经被广泛用于温度^[6-8]、湿度^[9-10]和折射率^[11-13]等参数的测量中,在医疗^[14]、结构^[15]和石油化工^[16]等领域中也得到了广泛的应用。光纤具有柔软性好、体积小、质量轻、耐高温、绝缘、抗电磁性良好和原子辐射抗干扰等优点。随着光纤应用的不断拓展,光纤也被应用于挥发性气体的检测中,研究人员将光纤与各种新材料进行结合形成新的结构以更好地检测 VOC。Wu 等^[17]提出了一种由单模光纤和沸石膜组成

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFF0217803)、广东省信息光子技术重点实验室(广东工业大学)开放课题基金(GK-PT20-04)

通信作者: *clzhao@cjl. edu. cn

的球形沸石薄膜涂层 VOC 光纤传感器,该传感器量程范围为 $0 \sim 70 \times 10^{-6}$,用于检测异丙醇和甲醛等挥发性气体,但其检测量程范围较小,不能对大量程的 VOC 进行检测。Liu 等^[18]提出了一种由单模光纤和尼罗红材料组成的 VOC 光纤传感器,可同时用于测量甲醇和乙醇。在实验过程中,随着 VOC 气体浓度的增加,尼罗红材料涂层的折射率会发生改变,涂层折射率的微小变化可利用锥形光纤结构进行监测。然而,该传感器的最大测量范围为 $0 \sim 45 \times 10^{-6}$,检测量程范围较小,不能对大量程的 VOC 进行检测。聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 作为一种高分子聚合物材料,具多种特性,如疏水性和高弹性等。同时,PDMS 的分子结构具有大量的微孔,遇到 VOC 时,会吸附气体分子,引起 PDMS 材料的体积膨胀,进而 PDMS 非常适合用于 VOC 气体的检测。Káčik 等^[19]提出了一种由单模光纤、长度可调的腔体和 PDMS 组成的用于检测 VOC 的紧凑型光纤传感器。类似地,Lowder 等^[20]将 PDMS 材料与光纤光栅结合来测量 VOC。

本文提出了一种基于 PDMS 的水滴型光纤 VOC 传感器,它是通过将一段弯曲成水滴状的单模光纤 (SMF) 封装在 PDMS 中形成的。当光纤弯曲到一定程度时,水滴型光纤结构中的回音壁模式得到了激发并与纤芯基模发生干涉,输出的干涉光谱会随着弯曲半径的变化而产生漂移,结合 PDMS 吸收 VOC 的特性,为测量大量程 VOC 提供了可行的方法。实验表明:当 PDMS 吸收 VOC 气体时,体积膨胀,水滴型光纤结构的有效弯曲长度减小,在 VOC 体积分数为 $0 \sim 9660 \times 10^{-6}$ 范围内,输出光谱发生蓝移,此时所提 VOC 传感器的灵敏度为 $-0.542 \text{ pm}/10^{-6}$,检测精度为 37×10^{-6} ,响应时间为 8.3 min ;当使用强度测量方法时,所提 VOC 传感器在 1539.00 nm 波长处灵敏度最大 ($-3.22 \times 10^{-4} \text{ dB}/10^{-6}$),检测精度为 31×10^{-6} 。所提 VOC 传感器通过对波长的监测,可实现对 VOC 的检测,且具有测量范围大、制作简单和成本低的特点。

2 水滴型光纤传感器原理

图 1 为水滴型光纤传感器的原理图,其中 R 是水滴形底部圆的半径, I_{in} 是输入的干涉光强度, I_{out} 是输出的干涉光强度。水滴型光纤传感器在 E 点和 F 点处分为两个部分,下半部分为正常光纤结构,上半部分为回音壁模式结构。当光从入射光纤进入时,光在 E 点处被分为两束,一部分光继续沿着纤芯传播,另一部分光由纤芯耦合到光纤包层中。当入射角大于临界角时,光在包层-空气界面处会发生全反射,形成回音壁模式 (WGM)。回音壁模式的光会在 F 点处重新耦合回纤芯中,并与纤芯基模发生干涉。因此,输出的干涉光强度^[21]可表示为

$$I_{out} = I_c + I_{WGM} + 2\sqrt{I_c I_{WGM}} \cos(\phi_0 + \Delta\phi), \quad (1)$$

式中: I_c 和 I_{WGM} 分别是纤芯模式和回音壁模式的强度; ϕ_0 是初始相位; $\Delta\phi$ 是纤芯基模与回音壁模式的相位差,可表示为

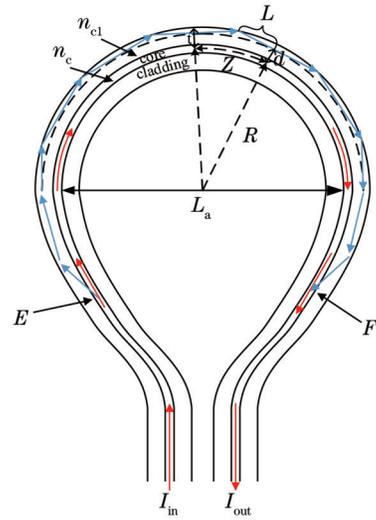


图 1 水滴型光纤传感器的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of droplet-type optical fiber sensor

$$\Delta\phi = N \left[\frac{2\pi}{\lambda} (n_{cl} 2L - n_{eff,c} Z) + \phi_r - \frac{\pi}{2} \right], \quad (2)$$

式中: N 是折返次数; n_{cl} 是包层回音壁模式的折射率; $n_{eff,c}$ 是纤芯的有效折射率; $\phi_r = -2\arctan \left[\frac{(n_{cl}^2 - n_{air}^2)^{1/2}}{(n_{cl} \tan \theta)} \right]$ 是包层-空气界面处因全反射产生的相移; L 是包层中的光路长度; Z 是纤芯的弧长; λ 是波长。

纤芯基模与回音壁模式结构的相位差为 $2m\pi$ 对应的是共振峰的位置。相位差为 $(2m+1)\pi$ 对应的是干涉谷的位置。干涉光共振峰波长 λ_m 可表示为

$$\lambda_m = \frac{2\pi(n_{cl} 2L - n_{eff,c} Z)}{m\pi/N + \pi/2 - \phi_r}, \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

由于 PDMS 材料的分子结构具有大量的微孔,故极易吸附气体分子,尤其当 PDMS 材料遇到 VOC 时,会对 VOC 分子有明显的吸附效应,导致 PDMS 材料的体积膨胀,引起水滴型光纤传感器的 E 点和 F 点向上移动,包层中回音壁模式的光路长度 $2NL$ 变小。由式 (3) 可以推导出,当回音壁模式的光路长度 $2NL$ 变小时,波长 λ_m 变小,波形图出现蓝移现象,监测波长的移动就可以实现对 VOC 浓度的传感测量。当水滴型光纤结构较大时,对应的水滴型光纤结构的直径 L_a 也较大,引起回音壁模式和纤芯模式的光程差变大,导致干涉谱线密集,不易读取。同时,由于传感器结构较大,故稳定性也会变差,进而导致结构形变引起额外的误差。当水滴型光纤结构变小时,对应的 L_a 也会变小,此时可形成较好的回音壁模式。当 L_a 进一步减小时,干涉谱线会变得稀疏,此时在光源检测范围内会出现不完整的干涉周期,其形状也将接近三角形,结构稳定不易发生形变,进而传感器对 VOC 的检测灵敏度降低。当 L_a 过小时,光纤易折断。因此,可以通过优化尺寸的方式获得较为理想的水滴型光纤传感器。

3 水滴型光纤传感器制作

图 2 是水滴型光纤传感器的制作过程。首先,将一段 SMF 的两端同时插入一根毛细管中,不断调整毛细管的位置,使 SMF 形成水滴型光纤结构。由于水滴型光纤结构的两端置于毛细管中时具有一定的张力和摩擦力,故可以使 SMF 保持水滴型光纤结构。然后,在毛细管中滴入适量的紫外(UV)固化胶对毛细管进行固定。结构制作完成后调配 PDMS 溶液进行封装: 1)将 PDMS 与固化剂按 10:1 的比例混合,制备 PDMS

前体;2)静置 PDMS 前体 5 h,并对均匀搅拌的 PDMS 前体进行脱气;3)将水滴型光纤结构放入一个边长为 18 mm 的方形玻璃模具中,并倒入脱气后的 PDMS 前体直至填充完成;4)将水滴型光纤结构传感器放在温度为 100 °C 的加热台上,加热 10 min 后固化,冷却后再小心地从模具中取出;5)用小刀沿着水滴型结构光纤传感器的边缘切除多余的 PDMS,进而完成传感器制作。实验中制作的水滴型光纤传感器的实物图如图 3 所示。水滴型光纤结构的直径为 8.2 mm,毛细管的长度为 5 mm、内径为 0.5 mm。

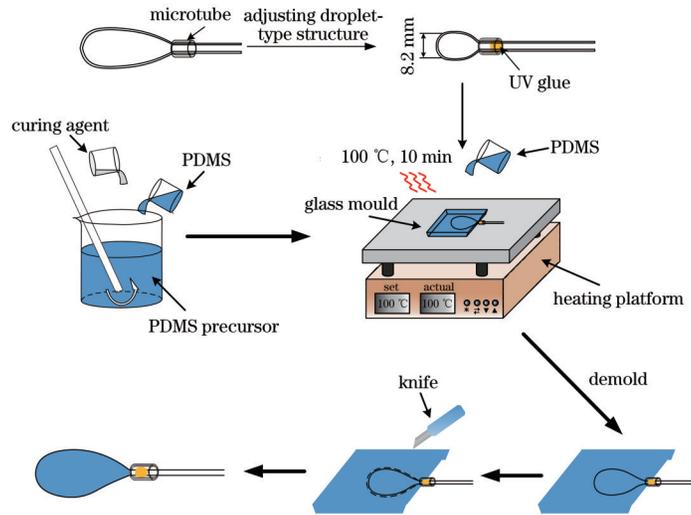


图 2 水滴型光纤传感器的制作过程

Fig. 2 Production process for droplet-type optical fiber sensor



图 3 水滴型光纤传感器实物图

Fig. 3 Physical diagram of droplet-type optical fiber sensor

4 实验与结果

4.1 实验装置

实验装置如图 4 所示,其中 SLED 为超辐射发光二极管。将水滴型光纤传感器置于一个体积为 5 L 的气室中,其两端分别与宽带光源(深圳市浩源光电技术有限公司, HY-SLE)和光谱仪(OSA, YOKOGAWA, AQ6370)连接,并利用光谱仪观察输出光谱的波长漂移情况。将一定厚度的玻璃片置于传感器下方,使传感器处于悬空状态,增大传感器与 VOC 的接触面积。在气室右侧有两个直径为 1.5 cm 的小孔,用于引出水滴型光纤传感器两端的跳线。在气室上方有一个直径

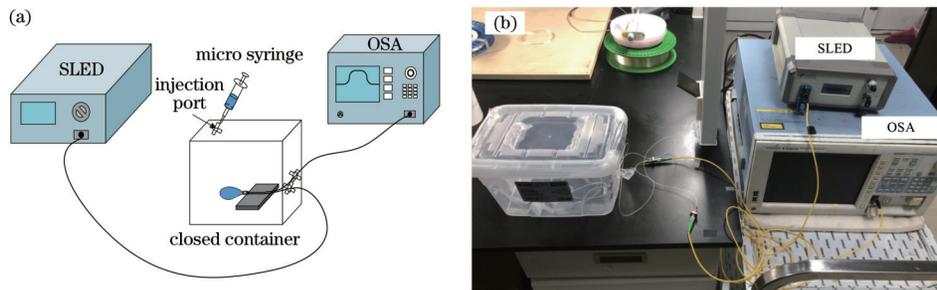


图 4 水滴型光纤传感器的实验装置图。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 4 Experimental setup of droplet-type optical fiber sensor. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

为 4 mm 的小孔,用于滴入异丙醇溶液。同时,这些小孔均用塑形胶封闭。

4.2 基于波长解调的实验结果分析

图 5(a)为水滴型光纤传感器在异丙醇体积分数为 0 时的输出光谱。实验过程中环境温度为 26 °C,可以观察到明显的回音壁模式引起的干涉现象。对传感

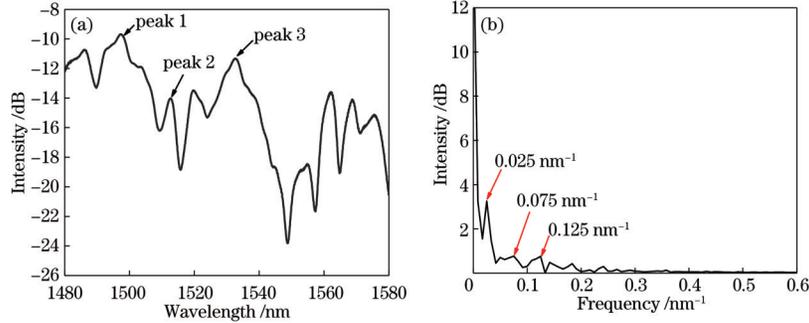


图 5 异丙醇体积分数为 0 时水滴型光纤传感器的输出光谱图和 FFT 图。(a)水滴型光纤传感器的输出光谱图;(b) FFT 图

Fig. 5 Output spectrum of droplet-type optical fiber sensor and FFT diagram when volume fraction of isopropyl alcohol is 0.

(a) Output spectrum of droplet-type optical fiber sensor; (b) FFT diagram

在上述环境下进行实验,气室内异丙醇体积分数由 0 升到 9660×10^{-6} ,每滴入一次异丙醇溶液,体积分数升高 966×10^{-6} 。当每次滴入的溶液全部挥发时,观察其输出光谱,待输出光谱稳定后,记录其光谱图,结果如图 6 所示。可以看出,传感器的输出光谱蓝移,这是因为 PDMS 分子间存在会吸附挥发性气体分子的微孔结构,当滴入 VOC 时,PDMS 体积膨胀,引起水滴型光纤传感器的 E 点和 F 点向上移动,此时水滴型光纤传感器的回音壁模式的光路长度 $2NL$ 减小,进而引起波长 λ_m 变小。

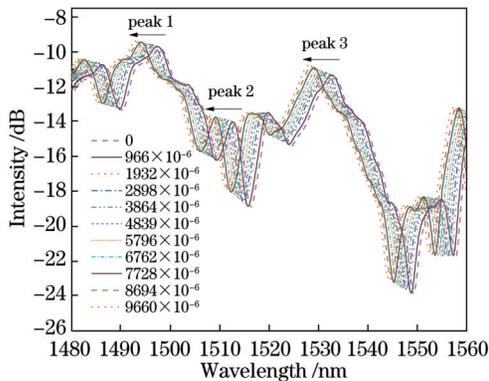


图 6 基于 PDMS 的水滴型光纤 VOC 传感器的光谱图

Fig. 6 Spectra of droplet-type optical fiber VOC sensor based on PDMS

选取干涉峰 1、干涉峰 2 和干涉峰 3 作为观测干涉峰,对应的波长分别为 1497.40、1512.72、1532.72 nm,干涉峰的拟合图如图 7 所示。干涉峰 1 的拟合曲线的方程为 $y = -4.95 \times 10^{-4}x + 1497.88$,灵敏度为 $-0.495 \text{ pm}/10^{-6}$,对应波长从 1497.40 nm 漂移到 1493.08 nm,漂移量为 4.32 nm,线性度为 $R^2 = 0.999$,如图 7(a)所示。图 7(b)、(c)分别展示了干涉

器的光谱图进行快速傅里叶变换(FFT),所得结果如图 5(b)所示,可以看出输出光谱由比较复杂的频谱成分构成,其中主导峰约位于 0.025 nm^{-1} 处。为了分析异丙醇气体浓度对传感器的影响,后续实验分 10 次进行,每次滴入 15 μL 质量分数为 99.7% 的异丙醇溶液,并观察水滴型光纤传感器光谱的输出情况。

峰 2 和干涉峰 3 的相应情况,其灵敏度分别为 $-0.524 \text{ pm}/10^{-6}$ 、 $-0.542 \text{ pm}/10^{-6}$ 。另外,光谱仪的最小分辨率为 0.02 nm,由此可得传感器的检测精度为 37×10^{-6} 。

在实验过程中,为了验证水滴型光纤传感器的重复性,在相同条件下对传感器进行了重复实验。干涉峰 3 的放大光谱图如图 8(a)所示。干涉峰 3 的 4 次实验对应的漂移量线性拟合曲线如图 8(b)所示,对应的灵敏度分别为 -0.522 、 -0.544 、 -0.518 、 $-0.533 \text{ pm}/10^{-6}$,相对误差为 -4.2% 。

此外,还对传感器的时间响应特性进行了研究,如图 9 所示。实验中滴入 15 μL 的异丙醇溶液,并每隔 1 min 记录一次光谱。随着异丙醇溶液的挥发,气室内异丙醇的体积分数由 0 逐渐升高到 966×10^{-6} ,波长逐渐蓝移,其响应时间为 10% 波长漂移量与 90% 波长漂移量所对应的时间差,实验结果为 8.3 min。

4.3 基于强度解调的实验结果分析

图 10 是异丙醇体积分数在 $0 \sim 9660 \times 10^{-6}$ 范围内,基于 PDMS 的水滴型光纤 VOC 传感器的部分放大光谱。选取在异丙醇浓度测量范围内,干涉强度单调变化且变化相对均匀的波长处作为监控波长,通过监控该波长处的强度来实现基于强度解调的 VOC 浓度传感。实验中选取 1526.44 nm 和 1539.00 nm 两个波长进行解调,如图 10 所示。表 1 展示了在 1526.44 nm 和 1539.00 nm 波长处干涉强度的变化情况。可以发现:在 1526.44 nm 波长处,干涉强度随着 VOC 浓度的增大而增大;在 1539.00 nm 波长处,干涉强度随着 VOC 浓度的增大而减小。为了更直观地分析干涉峰的强度变化和灵敏度,将数值拟合成曲线,如图 11 所示。

在 1526.44 nm 波长处,干涉强度随着 VOC 浓度的增加而增加,拟合曲线为线性曲线,拟合方程为 $y =$

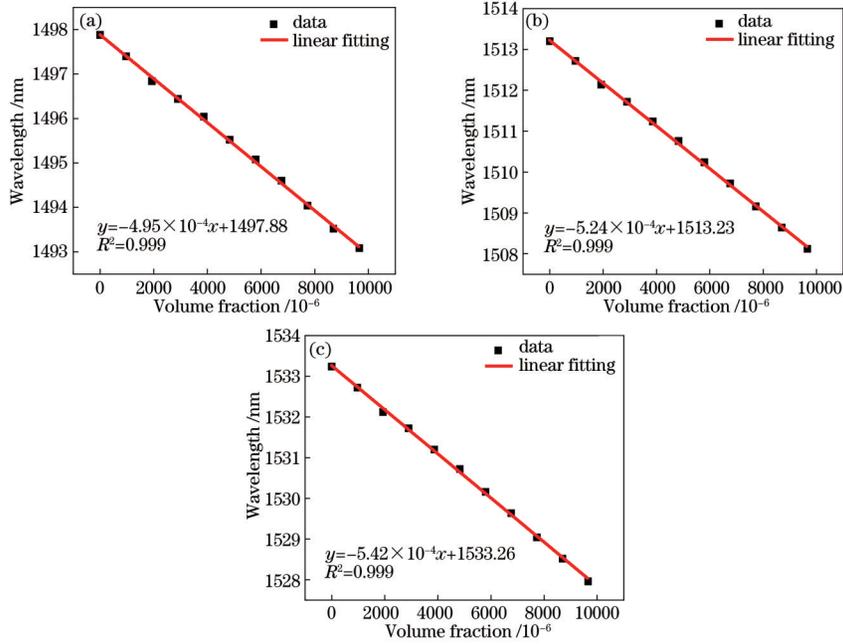


图 7 干涉峰线性拟合图。(a)干涉峰 1;(b)干涉峰 2;(c)干涉峰 3

Fig. 7 Linear fitting plot of interference peaks. (a) Peak 1; (b) peak 2; (c) peak 3

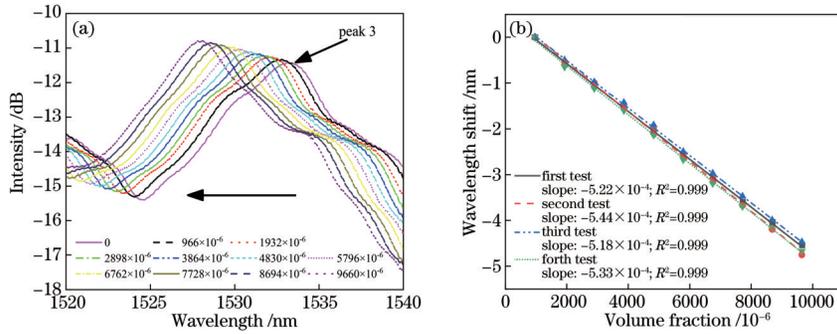


图 8 干涉峰 3 的重复性实验结果。(a)放大光谱图;(b) 4 次实验的线性拟合图

Fig. 8 Repeatable experimental results of peak 3. (a) Enlarged spectra; (b) linear fitting plot of four experiments

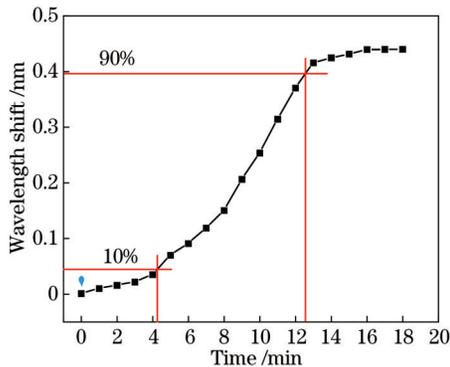


图 9 所提传感器的时间响应

Fig. 9 Time response of proposed sensor

$3.16 \times 10^{-4} x - 14.69$, 线性度为 $R^2=0.998$, 传感器的灵敏度为 $3.16 \times 10^{-4} \text{ dB}/10^{-6}$, 光谱仪的强度检测精度为 0.01 dBm , 检测精度为 31×10^{-6} 。在 1539.00 nm 波长处, 干涉强度随着 VOC 浓度的增加而减小, 呈线性关系, 拟合方程为 $y = -3.22 \times 10^{-4} x - 13.83$, 线性度为 $R^2=0.993$, 传感器的灵敏度

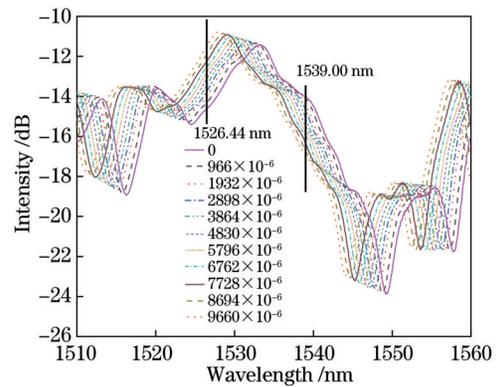


图 10 基于 PDMS 的水滴型光纤 VOC 传感器的部分放大光谱
Fig. 10 Partially amplified spectroscopy of droplet-type optical fiber VOC sensor based on PDMS

为 $-3.22 \times 10^{-4} \text{ dB}/10^{-6}$, 检测精度为 31×10^{-6} 。实验结果发现, 强度解调同样具有很好的线性度和灵敏度, 与波长解调相比, 二者分辨率相差不大, 但强度解调的成本较低。在实际使用中, 只需采用激光光源和探测

表 1 在 1526.44 nm 和 1539.00 nm 处的干涉强度变化
Table 1 Interference intensity change at 1526.44 nm and 1539.00 nm

Volume fraction / 10^{-6}	Interference intensity at 1526.44 nm / dB	Interference intensity at 1539.00 nm / dB
0	-14.652	-13.999
966	-14.365	-14.097
1932	-14.054	-14.370
2898	-13.817	-14.646
3864	-13.501	-15.066
4830	-13.191	-15.463
5796	-12.844	-15.742
6762	-12.578	-15.922
7728	-12.305	-16.310
8694	-11.954	-16.721
9660	-11.540	-16.930

器即可实现对强度的检测。

表 2 给出了所提传感器与已报道的 VOC 传感器测量范围和灵敏度的比较。基于与 FPI(沸石膜与球形端部构成弧形内嵌法布里-珀罗腔)^[17]、TSCSMF-MFC[基于锥形小芯单模光纤(TSCSMF)和超纤耦合

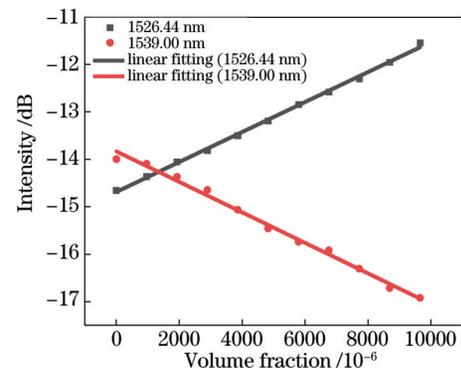


图 11 1526.44 nm 和 1539.00 nm 处干涉强度和 VOC 浓度的关系

Fig. 11 Relationship between interference intensity and VOC concentration at 1526.44 nm and 1539.00 nm

器(MFC)的高灵敏度 VOC 传感器^[18]、MoS₂-PC(基于 MoS₂ 少层光子晶体腔的高性能 VOC 微传感器)^[22]、IFPI[基于本征法布里-珀罗干涉仪(IFPI)的多吡咯薄膜 VOC 传感器]^[23]和 FPIs(基于 PDMS 包覆法布里-珀罗效应的 VOC 传感器)^[24]等结构的比较可以发现,本文所提传感器在具有较大测量范围的同时,具有相对较高的灵敏度。

表 2 传感器测量范围和灵敏度的比较

Table 2 Comparison of sensor measurement range and sensitivity

Sensor structure	Volume fraction range of VOC / 10^{-6}	Sensitivity	Ref.
FPI	0-70	281.9 pm/ 10^{-6}	[17]
TSCSMF-MFC	0-45	0.13 nm/ 10^{-6}	[18]
MoS ₂ -PC	0-1000	0.37 pm/ 10^{-6}	[22]
IFPI	65-455	0.0423 dB/ 10^{-6}	[23]
FPIs	0-500	20 pm/ 10^{-6}	[24]
Droplet-type structure	0-9660	-0.542 pm/ 10^{-6}	This work

5 结 论

提出了一种基于 PDMS 的水滴型光纤 VOC 传感器,实验研究了传感器在 $0\sim 9660\times 10^{-6}$ VOC 体积分数范围内的响应情况。实验结果表明:基于 PDMS 的水滴型光纤传感器干涉峰的漂移量与 VOC 浓度呈线性关系;对波长进行解调,传感器的灵敏度达到了 $0.542\text{ pm}/10^{-6}$,检测精度为 37×10^{-6} ,响应时间为 8.3 min;对强度进行解调,1539.00 nm 波长处的灵敏度最大 ($-3.22\times 10^{-4}\text{ dB}/10^{-6}$),检测精度为 31×10^{-6} 。此外,本实验中的 VOC 浓度还可继续增加。所提传感器具有测量量程大、结构简单、制作容易和成本低等优点,在 VOC 检测方面具有一定的实用价值。

参 考 文 献

[1] 张鸿. 工业挥发性有机物 VOCs 的危害及防治措施的对
比研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(9): 176-
177, 182.

Zhang H. Comparative study on the harm of industrial
volatile organic compounds VOCs and preventive
measures[J]. Modern Industrial Economy and
Informationization, 2021, 11(9): 176-177, 182.

[2] 闫格, 张磊, 于玲, 等. 面向天然气泄漏检测的中红外
甲烷传感系统与应用[J]. 中国激光, 2022, 49(18):
1810001.
Yan G, Zhang L, Yu L, et al. Analysis and detection of
volatile organic compounds in air[J]. Chinese Journal of
Lasers, 2022, 49(18): 1810001.
[3] 李明芳. 环境空气中挥发性有机物监测技术[J]. 中国科
技信息, 2020, (24): 79, 81.
Li M F. Monitoring technology of volatile organic
compounds in ambient air[J]. China Science and
Technology Information, 2020, (24): 79, 81.
[4] 杨萌, 许信. 环境监测中挥发性有机物监测方法的运用
[J]. 资源节约与环保, 2021, (12): 61-63.
Yang M, Xu X. Application of volatile organic
compounds monitoring method in environmental

- monitoring[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2021, (12): 61-63.
- [5] 罗晓妍. 家具生产废气中挥发性有机物的检测方法探析[J]. *中国新技术新产品*, 2021, (9): 59-61.
Luo X Y. Analysis of detection methods of volatile organic compounds in the waste gas of furniture production[J]. *New Technology & New Products of China*, 2021, (9): 59-61.
- [6] 付广伟, 刘畅, 王梦梅, 等. 基于表面石墨烯修饰的锥形多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0906002.
Fu G W, Liu C, Wang M M, et al. Tapered multimode fiber temperature sensor based on surface graphene modification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0906002.
- [7] Chou Y L, Wu C W, Jhang R T, et al. A novel optical fiber temperature sensor with polymer-metal alternating structure[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 186-192.
- [8] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0306003.
Zhang P, Liu B, Liu Z D, et al. Temperature and humidity sensor based on a graphene oxide-coated side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0306003.
- [9] 徐妍妍, 李俊, 李浩, 等. 基于拉锥七芯光纤的湿度传感器研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(23): 2306002.
Xu Y Y, Li J, Li H, et al. Research on humidity sensor based on tapered seven core fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(23): 2306002.
- [10] 邵敏, 孙浩男, 张蓉, 等. 基于光子晶体光纤的迈克耳孙干涉仪型湿度传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2406002.
Shao M, Sun H N, Zhang R, et al. Michelson interferometric humidity sensor based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2406002.
- [11] Ayupova T, Shaimerdenova M, Korganbayev S, et al. Fiber optic refractive index distributed multi-sensors by scattering-level multiplexing with MgO nanoparticle-doped fibers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(5): 2504-2510.
- [12] 包益宁, 刘秀红, 胡劲华, 等. 基于凹型谐振光栅的高性能光学折射率传感器[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0913001.
Bao Y N, Liu X H, Hu J H, et al. High-performance optical refractive index sensor based on concave resonant grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0913001.
- [13] 郝晋青, 韩丙辰. 基于游标效应的高灵敏度光纤耦合器折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0206002.
Hao J Q, Han B C. Ultrasensitive refractive index sensor based on optical fiber couplers assisted with vernier effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0206002.
- [14] Li M, He B, Zhao X G, et al. A wearable fiber-optic sensor for monitoring human elbow and wrist joint motion[J]. *Advanced Robotics*, 2021, 35(7): 400-412.
- [15] Wijaya H, Rajeev P, Gad E. Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: field applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102577.
- [16] Vahdati N, Wang X T, Shiryayev O, et al. External corrosion detection of oil pipelines using fiber optics[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 684.
- [17] Wu B Q, Zhao C L, Kang J, et al. Characteristic study on volatile organic compounds optical fiber sensor with zeolite thin film-coated spherical end[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 91-97.
- [18] Liu D J, Kumar R, Wei F F, et al. High sensitivity optical fiber sensors for simultaneous measurement of methanol and ethanol[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 271: 1-8.
- [19] Káčik D, Martinček I, Tarjányi N, et al. Polydimethylsiloxane coated optical fiber sensor for detection of organic volatile compounds[C]//2016 ELEKTRO, May 16-18, 2016, Strbske Pleso, Slovakia. New York: IEEE Press, 2016: 620-623.
- [20] Lowder T L, Gordon J D, Schultz S M, et al. Volatile organic compound sensing using a surface-relief D-shaped fiber Bragg grating and a polydimethylsiloxane layer[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2523-2525.
- [21] Liu T G, Chen Y F, Han Q, et al. Sensor based on macrobent fiber Bragg grating structure for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4): 791-795.
- [22] Zhao C Y, Gan X T, Yuan Q C, et al. High-performance volatile organic compounds microsensor based on few-layer MoS₂-coated photonic crystal cavity[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(6): 1700882.
- [23] Lin Y F, Dong X Y, Yang J, et al. Miniature optical fiber sensor based on polypyrrole for detection of VOCs [C]//16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [24] Zhao C L, Han F, Li Y N, et al. Volatile organic compound sensor based on PDMS coated Fabry-Perot interferometer with Vernier effect[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(12): 4443-4450.