

doi: 10.3788/gzxb20174601.0106003

基于 PDMS 材料的 Sagnac 干涉光纤挥发性有机物传感器

吴彬青, 赵春柳, 丁振名

(中国计量大学 光学与电子科技学院 杭州 310018)

摘 要: 在一段 8 cm 长的保偏光纤两端分别熔接两段普通的单模光纤, 在保偏光纤的侧面均匀地镀上一层聚二甲基硅氧烷材料, 聚二甲基硅氧烷材料经该段保偏光纤接入到一个光纤耦合器中, 从而形成一个光纤 Sagnac 干涉仪. 聚二甲基硅氧烷材料吸附挥发性有机物分子时, 会引起聚二甲基硅氧烷材料体积上的膨胀, 导致 Sagnac 干涉波长的漂移, 通过对 Sagnac 干涉光波长漂移的测量即可实现对挥发性有机物气体的检测. 实验测量了传感器对挥发性有机物浓度的响应, 结果表明, 在 0~6 000 ppm 浓度范围内, 传感器的灵敏度为 1.03 pm/ppm, 由光谱仪的最小分辨率为 0.02 nm 可知, 该传感器对挥发性有机物的检测下限约为 19.4 ppm. 该传感器相比聚二甲基硅氧烷材料与光纤光栅结合的传感器, 灵敏度提高了 4 300 倍.

关键词: 光纤传感; 聚二甲基硅氧烷; Sagnac 干涉; 保偏光纤; 挥发性有机物

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0106003-7

Sagnac Interferometer Fiber Volatile Organic Compounds Sensor Based on PDMS

WU Bin-qing, ZHAO Chun-liu, DING Zhen-ming

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

Abstract: To fabricate the Sagnac interferometer sensor, a polarization-maintaining fiber with the length of 8 cm was spliced between two single-mode fibers, and the polydimethylsiloxane material was coated on the polarization-maintaining fiber, then the polydimethylsiloxane functionalized polarization-maintaining fiber was integrated into a fiber coupler to form a Sagnac loop. When the polydimethylsiloxane absorbs volatile organic compounds, the polydimethylsiloxane will be swelled and the wavelength of interference peak will shift, so that the concentration of volatile organic compounds can be measured by monitoring wavelength shift. The response of the sensor to the concentration of volatile organic compounds was measured experimentally, and the results show that the sensitivity of the sensor is 1.03 pm/ppm when the concentration ranges from 0 ppm to 6 000 ppm. The optical spectrum analyzer with a 0.02 nm measurement precision was used in experiments, so the precision could reach about 19.4 nm in the concentration range from 0 to 6 000 ppm. The sensor's sensitivity improves 4 300 times which compared to grating fiber with polydimethylsiloxane material sensor.

Key words: Fiber optics sensors; Polydimethylsiloxane; Sagnac interferometer; Polarization maintaining fiber; Volatile organic compounds

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2420; 060.4262; 310.6845

基金项目: 浙江省国际科技合作专项项目(No. 2013C24018)资助

第一作者: 吴彬青(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 1099407934@qq.com

导师(通讯作者): 赵春柳(1973-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感. Email: zhchunliu@hotmail.com

收稿日期: 2016-07-18; 录用日期: 2016-09-30

0 引言

挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)通常是指沸点在 $50\sim 260^{\circ}\text{C}$ 的各种有机化合物,它们在常温、常压下易挥发,不仅会造成环境污染,也会严重损害人体健康^[1].目前检测挥发性有机物最主要的手段有质谱法^[2-3]和气相色谱法^[4-5].尽管这些方法可以实现高精度、高分辨能力的挥发性有机物检测,但检测周期较长、检测成本高昂,仅能满足于实验室和科研机构对气体检测的需求.因此,建立一套灵敏、快速、简单、可靠的方法来检测 VOCs 非常必要.

近年来,光纤传感器因灵敏度高、抗电磁干扰能力强以及成本低等特点,被广泛应用于折射率^[6]、温度^[7]、湿度^[8]和应变^[9-11]等参数的测量.将光纤传感器应用于挥发性有机物的检测已经有相关的报道.牛萃^[12]等提出一种挥发性有机物传感器,利用高双折射光子晶体光纤环境的干涉谱对相位变化非常敏感的特性,实现挥发性有机物浓度的检测,其灵敏度可达 15.5 pm/ppm .将光纤传感器与敏感膜结合去检测挥发性有机物也已有报道.宁向平^[13]等提出一种表面镀有沸石膜的球形光纤挥发性有机物传感器,利用沸石膜吸附 VOCs 分子后引起其折射率的变化,导致干涉波长的漂移,实现对挥发性有机物的浓度监测,其灵敏度可达 0.91 nm/ppm .

光纤 Sagnac 环常被用来进行温度、应变、角速度等的传感,伍铁生^[14]等将一段填充乙醇的高双折射光子晶体光纤与 3 dB 耦合器熔接制作成 Sagnac 干涉仪结构的光纤环境,实现了温度传感,其温度灵敏度为 $8.837\text{ nm/}^{\circ}\text{C}$.O. Frazao 等^[15]将高双折射光纤和长周期光纤光栅同时加入到 Sagnac 环中,实现了温度和应变的区分测量,其最大误差分别为 $\pm 21\text{ }\mu\epsilon$ 和 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$.光纤 Sagnac 环结构简单,性能稳定,应用领域越来越广泛.

聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)是一种由 $-\text{OSi}(\text{CH}_3)_2-$ 基团构成的重复性的交联弹性聚合物,具有很好的热稳定性、气体透过性和结构可塑性. PDMS 的分子结构具有很强的各向同性和均匀性^[16],被广泛应用于微流道的制作和集成电路(Integrated Circuit, IC)封装^[17].此外 PDMS 还具有非常好的疏水性和气体透过性^[18]. PDMS 材料的分子结构具有大量的微孔结构,极易吸附气体分子.尤其当 PDMS 材料遇到挥发性有机物时,其会对 VOCs 分子有明显的吸附效应,引起 PDMS 材料体积上的膨胀. Lowder TL 等^[19]利用 PDMS 的膨胀效应,将 PDMS 材料与光纤光栅结合来测量挥发有机物,传感器灵敏度为 $2.38\times 10^{-4}\text{ pm/ppm}$,灵敏度不高,限制了检测下限.

本文提出了一种基于 PDMS 材料的 Sagnac 干涉光纤挥发性有机物传感器.在一段 8 cm 长的保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)两端分别熔接两段普通的单模光纤,在 PMF 的侧面均匀地镀上一层 PDMS 材料,并经该段 PMF 接入到一个光纤耦合器中,从而形成一个光纤 Sagnac 干涉仪.当 PDMS 材料吸附 VOCs 分子时,会引起 PDMS 材料体积上的膨胀,从而引起 Sagnac 干涉波长的漂移,通过对 Sagnac 干涉光波长漂移的测量即可实现对挥发性有机物的检测.

1 传感器的装置与原理

1.1 实验装置

图1是基于Sagnac干涉的光纤挥发性有机物传感系统实验装置,包括宽带光源(Broadband Source,

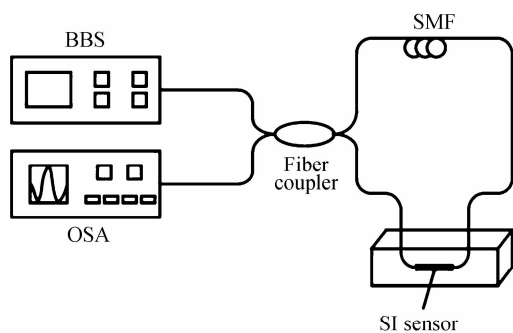


图1 Sagnac干涉光纤挥发性有机物传感实验装置

Fig. 1 System setup for the Sagnac interferometer sensor of volatile organic compounds

BBS)、3 dB 耦合器、单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF)、镀有 PDMS 材料的保偏光纤和光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA). 光源为中心波长为 1 550 nm 的宽带光源,宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器分为两束等强度的光,其中一束沿顺时针方向传播,另外一束沿逆时针方向传播,经过保偏光纤的正反两束光产生光程差,会发生干涉,返回 3 dB 耦合器,最后由 Sagnac 环^[20]输出的光进入光谱分析仪.

1.2 传感器结构与原理

图 2 是镀有 PDMS 的传感探头结构. 该传感探头是由一段长为 8 cm 的保偏光纤除去表面涂覆层后,经过 Plasma 溶液清洗除去表面杂质和油脂,然后将其两端分别与两段普通单模光纤熔接而成. 将熔接后的保偏光纤固定于一个圆筒形的模具上,然后将 PDMS 溶液缓慢注入模具当中,在 60℃ 条件下经过 5h 的加热,使得 PDMS 材料交联. PDMS 位于保偏光纤和单模光纤的两个熔接点之间. 将镀有 PDMS 膜的保偏光纤接入到光纤耦合器的两端,由此形成一个 Sagnac 光纤干涉传感系统.

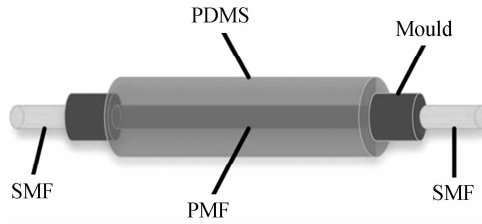


图 2 镀有 PDMS 的传感探头结构

Fig. 2 Construction of the PDMS-coated Sagnac interferometer sensor

当 PDMS 材料吸收 VOC 气体分子时,由于其膨胀效应导致 PMF 受到轴向的拉伸力,使之长度 L 增加. 当挥发性有机物浓度变化时,其会改变经过保偏光纤的正反两束光产生的光程差,从而改变光纤 Sagnac 环中的光程差,通过解调 Sagnac 环的光程差,即可实现对挥发性有机物浓度的传感.

入射光经 3 dB 耦合器后分为两个相向传输的光信号,两束光经过保偏光纤后产生光程差,当它们再次进入 3dB 耦合器时发生干涉. Sagnac 干涉谱 T 可以表示为

$$T = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot \Delta n L}{\lambda}\right) \right] / 2 \quad (1)$$

式中, $\Delta n L$ 表示光经过 Sagnac 环后产生的光程差, λ 表示光波长, Δn 为 PMF 两个偏振模式的有效折射率之差, L 表示 PMF 的长度.

结合式(1)可得干涉光峰漂移 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n \cdot L) \quad (2)$$

PDMS 材料吸附 VOC 气体分子引起膨胀效应,使得 PMF 受到轴向的拉力,并使长度 L 增加. 由此,通过检测由 PDMS 吸收 VOCs 分子后膨胀引起的 Sagnac 干涉仪的干涉峰漂移,可实现对 VOCs 气体浓度的测量.

2 实验结果与分析

2.1 PDMS 材料配比的选取

光纤挥发性有机物传感器所用的 PDMS 材料是由聚合物前体 (Sylgard 184-A) 和固化剂 (Sylgard 184-B) 按一定比例混合制成. 通常两种材料的混合比例为 10 : 1, PDMS 粘附性好,但是膨胀效果差,为提高 PDMS 的膨胀效果,将该比例优化为 5 : 1,该配比下 PDMS 的粘附性和膨胀效果都比较好,如果继续提高配比,虽然 PDMS 会变得更蓬松,但是粘附性变差,与光纤结合的效果差. 图 3 是 PDMS 在不同混合比例下的膨胀对比. 由图 3 可知,这两种混合比例条件下的传感器灵敏度明显不同. 10 : 1 配比下的灵敏度为 0.001 nm/ppm,而 5 : 1 配比下的灵敏度为 0.002 nm/ppm,即 5 : 1 配比条件下的灵敏度更高,且此时 PDMS 材料具有更好的膨胀效果. 这主要是由于在 5 : 1 的混合条件下,聚合物前体与固化剂两种材料的反应更加充分,当吸附相同数量的挥发性有机物分子后,其膨胀产生的应力有更好的传导效果. 因此所用 PDMS 材料均由聚合物前体 (Sylgard 184-A) 和固化剂 (Sylgard 184-B) 按 5 : 1 的比例混合制成.

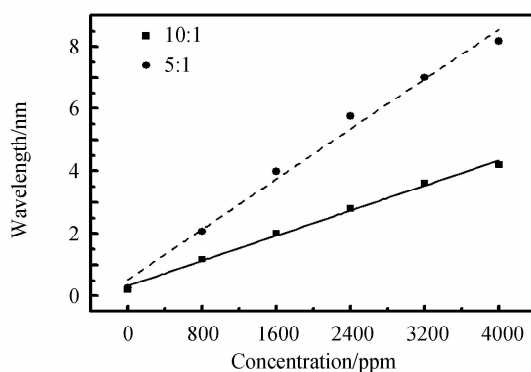


图3 在两种不同混合比例下的膨胀效果对比

Fig. 3 Swelling performance contrast of two different mixing ratios

2.2 基于波长解调的实验结果分析

图4是异丙醇浓度在0~6 000 ppm范围,基于PDMS材料的Sagnac干涉的光纤挥发性有机物传感器光谱图。从图4中可以看出干涉峰初始位置约在1 534 nm处,干涉峰间的波长间隔约为20 nm。光谱图中有很多杂乱的小干涉峰,但是从光谱包络线的大概位置可以估计,随着异丙醇气体浓度的增加,干涉峰向长波方向漂移了约6 nm,强度变化了约1 dB。为了更准确分析波长的漂移量,采用快速傅里叶变换低通滤波的方式,将小干涉峰的影响去除,图5是低通滤波后的干涉光谱。从图5中可以看出,滤波之后光谱的形状基本没有改变,光谱变的平滑,小干涉峰已经被滤除,干涉峰初始位置在1 533.8 nm处,干涉峰间的波长间隔为21.7 nm。异丙醇浓度从0 ppm增加到6 000 ppm的过程中,干涉峰向长波方向漂移了6.3 nm,强度变化了1.44 dB。干涉波长的漂移是由于PDMS材料对挥发性有机物分子吸附导致其膨胀,使得其包裹的一段保偏光纤随之被拉伸,导致Sagnac干涉光的波长发生变化。

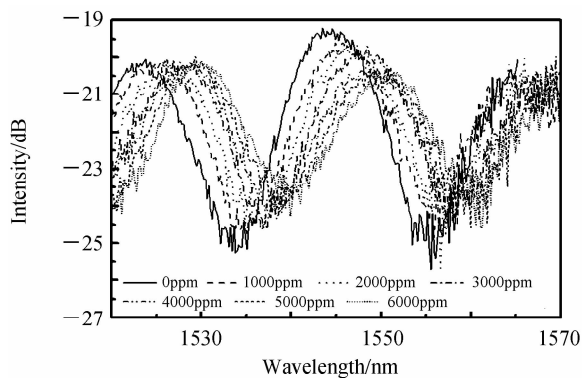


图4 基于PDMS材料的Sagnac干涉的光纤挥发性有机物传感器光谱

Fig. 4 The interference spectra of PDMS-coated Sagnac interferometer sensor in response to volatile organic compounds

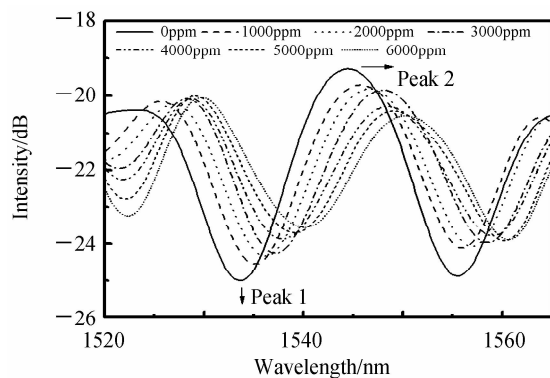


图5 低通滤波后的干涉光谱

Fig. 5 The interference spectra with low pass fast Fourier transform Filter

图6是干涉峰漂移与挥发性有机物浓度变化关系曲线。为了更好地说明干涉峰漂移与有机物浓度的关系,选取了1 533.84 nm和1 544.38 nm两处峰进行拟合。如图6,挥发性有机物浓度从0 ppm逐渐增加到6 000 ppm的过程中,干涉峰1从1 534.17 nm漂移到1 540.48 nm。拟合曲线为线性关系,拟合方程为 $y = 0.001\ 03x + 153\ 4.3$,拟合度为0.996 42。传感器的灵敏度为1.03 pm/ppm,由光谱仪的最小分辨率为0.02 nm可知,该传感器对挥发性有机物的检测下限为19.4 ppm。干涉峰2从1 544.38 nm漂移到了1 550.34 nm。拟合曲线也为线性关系,拟合方程为 $y = 0.000\ 97x + 1\ 544.58$,灵敏度为0.97 pm/ppm。两个峰漂移的灵敏度相差不大,并且拟合均为线性关系,考虑到光谱带有小的谐振峰,实验分析时可以采用平均值来进行分析。与文献[17]提出的传感器结构相比,灵敏度提高了4 300倍。总体来说,该传感器的最小测量浓度为19.4 ppm,测量挥发性有机物浓度的量程大,实验只测量了到了6 000 ppm,但是传感器并未达到饱和。传感器的响应时间约为1 min,其响应时间和量程会受传感器PDMS的厚度的影响,PDMS的厚度越大,

吸附饱和所需要的时间越长,所以响应时间越长,量程越大,相反,如果需要响应时间短,量程较小,可以适当减小 PDMS 膜的厚度。

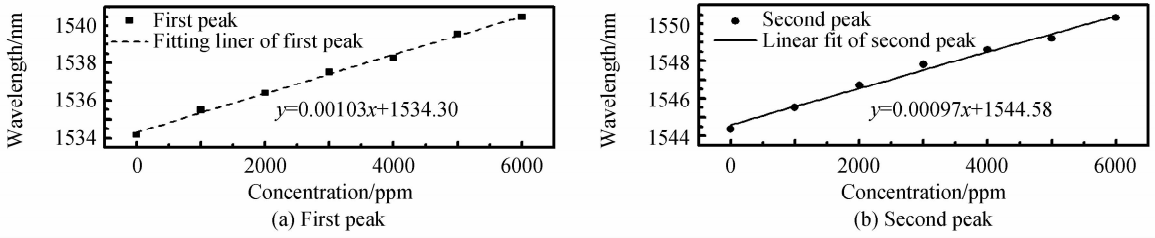


图 6 干涉峰漂移与挥发性有机物浓度变化关系曲线

Fig. 6 Relationship between the interference fringes shift and the VOCs concentration

2.3 基于强度解调的实验结果分析

图 7 是异丙醇浓度在 0~6 000 ppm 范围,基于 PDMS 材料的 Sagnac 干涉的光纤挥发性有机物传感器的部分放大光谱.选取在固定波长处的干涉强度作为气体浓度的解调方式.如图 7,选取 1 534.48 nm 和 1 544.28 nm 两个波长来解调.表 1 是在 1 534.48 nm 和 1 544.28 nm 处随挥发性有机物浓度变化的干涉强度变化.从表 1 可知,在 1 534.48 nm 处,Sagnac 干涉强度随着挥发性有机浓度的增加而增加,在 1 544.28 nm 处,Sagnac 干涉强度随着挥发性有机浓度的增加而减小,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 8.

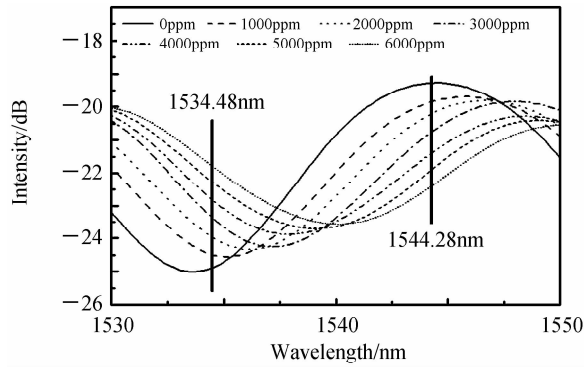


图 7 基于 PDMS 材料的 Sagnac 干涉的光纤挥发性有机物传感器的部分放大光谱
Fig. 7 The interference amplifying spectra of PDMS-coated Sagnac interferometer sensor in response to volatile organic compounds

表 1 在 1 534.48 nm 和 1 544.28 nm 处的干涉强度变化

Table 1 The variations of interference intensity at 1 534.48 nm and 1 544.28 nm

Gas concentration/ppm	Interference intensity/dB	
	1 534.48 nm	1 544.28 nm
0	-24.95	-19.28
1 000	-24.48	-19.82
2 000	-23.94	-20.21
3 000	-23.41	-20.69
4 000	-22.85	-20.30
5 000	-22.32	-21.87
6 000	-21.81	-22.40

图 8 是在 1 534.48 nm 和 1 544.28 nm 处 Sagnac 干涉强度和挥发性有机物浓度的关系曲线.在 1 534.48 nm 处,Sagnac 干涉强度随着挥发性有机浓度的增加而增加,拟合曲线为线性关系,拟合方程为 $y = 5.29 \times 10^{-4}x - 24.98$,拟合度为 0.996.传感器的灵敏度为 5.29×10^{-4} dB/ppm.光谱仪的强度测量精度为 0.01 dBm,所以在 1 534.48 nm 处的检测下限为 18.9 ppm.在 1 544.28 nm 处,Sagnac 干涉强度随着挥发性有机浓度的增加而减小,拟合曲线也是线性关系,拟合方程为 $y = -5.19 \times 10^{-4}x - 19.236$,拟合度为 0.999.传感器的灵敏度为 5.19×10^{-4} dB/ppm.光谱仪的强度测量精度为 0.01 dBm,所以在 1 544.48 nm 处的检测

下限为 19.3 ppm.

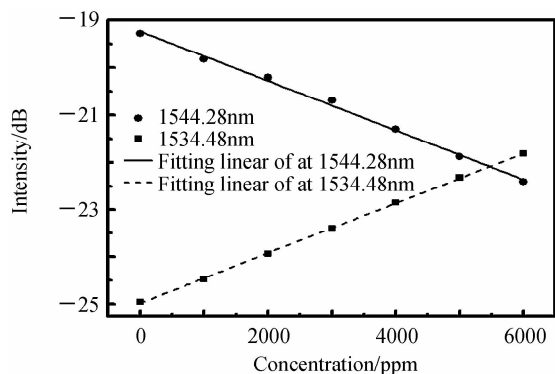


图 8 干涉峰强度与挥发性有机浓度变化的关系曲线

Fig. 8 Relationship between the interference fringes intensity and the VOCs concentration

2.4 波长解调结果与强度解调结果对比

表 2 是波长解调和强度解调结果的参数对比. 图 9 是波长解调关系曲线与强度解调关系曲线对比. 结合表 2 和图 9 可知, 波长解调和强度解调都呈线性关系, 波长解调的灵敏度要高于强度解调的灵敏度, 波长解调的检测下限与在 1 544. 28 nm 处强度解调的检测下限基本相同, 但是在 1 534. 48 nm 处的强度解调下限要比波长解调的下限小 0. 5 ppm. 总体来说, 两种解调结果差别不大.

表 2 波长解调结果与强度解调结果参数对比

Table 2 The parametric comparison between the interference fringes shift and intensity

Demodulation method	Demodulation results	Sensitivity	Limit of detection
Wavelength demodulation (peak1)		1. 03 pm/ppm	19. 4 ppm
Wavelength demodulation (peak2)		0. 97 pm/ppm	20. 6 ppm
Intensity demodulation (at 1 534. 48 nm)		$5. 29 \times 10^{-4}$ dB/ppm	18. 9 ppm
Intensity demodulation (at 1 544. 28 nm)		$5. 19 \times 10^{-4}$ dB/ppm	19. 3 ppm

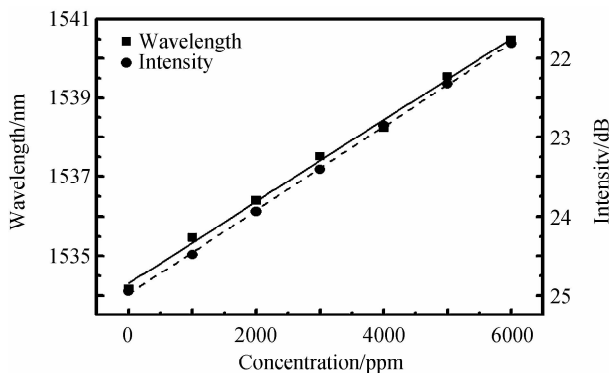


图 9 波长解调关系曲线与强度解调关系曲线对比图

Fig. 9 The comparison between the interference fringes shift and intensity

3 结论

本文提出了一种基于 PDMS 材料的 Sagnac 干涉的光纤挥发性有机物传感器, 并实验研究了传感器在挥发性有机物浓度为 0~6 000 ppm 范围内的响应. 实验结果表明, Sagnac 干涉峰的漂移量与挥发性有机物的浓度呈线性关系, 传感器的灵敏度在 0~6 000 ppm 范围内达到了 1. 03 pm/ppm, 相比 PDMS 材料与光纤光栅结合的传感器, 灵敏度提高了 4 300 倍. 传感器强度解调的灵敏度在 1 534. 48 nm 和 1 544. 28 nm 处分别为 $5. 29 \times 10^{-4}$ dB/ppm 和 $5. 19 \times 10^{-4}$ dB/ppm, 对比可知, 该传感器用波长解调的灵敏度要高于强度解调的灵敏度. 该传感器具有测量量程大、灵敏度高、结构简单、制作容易及成本低等优点, 在挥发性有机物检测方面具有一定的实用价值.

参考文献

- [1] ORWELL R L, WOOD R A, BURCHETT M D, *et al.* The potted-plant microcosm substantially reduces indoor air VOC pollution; II. Laboratory study[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2006, **177**(1-4): 59-80.
- [2] WARNEKE C, DE GOUW JA, KUSTER WC, *et al.* Validation of atmospheric VOC measurements by proton-transfer-reaction mass spectrometry using a gas-chromatographic pre-separation method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(11): 2494-2501.
- [3] JORDAN A, HAIDACHER S, HANEL G, *et al.* A high resolution and high sensitivity proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-TOF-MS)[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2009, **286**(2): 122-128.
- [4] WANG J L, DIN G Z, CHAN C C. Validation of a laboratory-constructed automated gas chromatograph for the measurement of ozone precursors through comparison with a commercial analogy[J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, **1027**(1): 11-18.
- [5] ZAMPOLLI S, ELMI I, MANCARELLA F, *et al.* Real-time monitoring of sub-ppb concentrations of aromatic volatiles with a MEMS-enabled miniaturized gas-chromatograph[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, **141**(1): 322-328.
- [6] ZHAO Xue, SHAO Min, QIAO Xue-guang, *et al.* Refractive index sensing of in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on two fiber tapers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0206006.
兆雪,邵敏,乔学光,等. 光纤锥在线型马赫-曾德干涉仪的折射率传感器特性[J]. 光子学报, 2016, **45**(2): 0206006.
- [7] LIU Jian-qing, YIN Fei-fei, LI Jian-qiang, *et al.* Resolution improved raman distributed temperature sensors based on error compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0128002.
刘建青,尹飞飞,李建强,等. 基于误差补偿的分布式喇曼温度传感器[J]. 光子学报, 2014, **43**(S1): 0128002.
- [8] ZHANG Yun-shan, QIAO Xue-guang, SHAO Min, *et al.* Humidity sensor based on waost-enlarged fiber tapers cascade structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0328004.
张芸山,乔学光,邵敏,等. 基于光纤锥级联结构的温度传感器[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 0328004.
- [9] FU Xing-hu, XIE Hai-yang, WANG Liu-liu, *et al.* Pressure sensor based on cascading single mode fiber with multimode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0406005.
付兴虎,谢海洋,王柳柳,等. 单模与多模光纤级联压力传感器[J]. 光子学报, 2015, **44**(4): 0406005.
- [10] WANG Hua-ping, XIANG Ping. Optimization design of optical fiber sensors based on strain transfer theory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1233-1241.
王花平,向平. 基于应变传递理论的光纤传感器优化设计[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(6): 1233-1241.
- [11] WANG Hua-ping, ZHOU Zhi, WANG Qian, *et al.* Strain transfer error of optical fiber sensors embedded in asphalt pavement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1499-1057.
王花平,周智,王倩,等. 光纤传感器埋入沥青路面基体的应变传递误差 [J]. 光学精密工程, 2015, **23**(6): 1499-1057.
- [12] NIU L, ZHAO C L, QI L, *et al.* Photonic crystal fiber loop mirror-based chemical vapor sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(20): 4416-4421.
- [13] XIANG NING, CHUNLIU ZHAO, JINGYIYANG, *et al.* Zeolite thin film-coated spherical end-face fiber sensors for detection of trace organic vapors[J]. *Optics Communications*, 2016, **364**(1): 55-59.
- [14] WU Tie-sheng, WANG Li, WANG Zhe, *et al.* A photonic crystal fiber temperature sensor based on sagnac interferometer structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(11): 1114002.
伍铁生,王丽,王哲,等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1114002.
- [15] FRAZAO O, MARQUES LM, SANTOS S, *et al.* Simultaneous measurement for strain and temperature based on a long-period grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(22): 2407-2409.
- [16] McDonald J C, WHITESIDES G M. Poly (dimethylsiloxane) as a material for fabricating microfluidic devices[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2002, **35**(7): 491-499.
- [17] JO B H, Van LERBERGHE L M, MOTSEGOOD K M, *et al.* Three-dimensional micro-channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, **9**(1): 76-81.
- [18] JIN M, FENG X, XI J, *et al.* Super-hydrophobic PDMS surface with ultra-low adhesive force[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2005, **26**(22): 1805-1809.
- [19] LOWDER T L, GORDAN 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.
- [20] YANG Yuan-hong, WANG Huan, YANG Fu-ling, *et al.* Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on sagnac interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(8): 1-5.
杨远洪,王欢,杨福铃,等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2014, **34**(8): 1-5.