

文章编号 1004-924X(2024)24-3545-09

椭球状非本征法布里-珀罗光纤探针的传感特性

李恭烨, 石胜辉*, 罗彬彬, 邹雪, 陈建, 赵明富
(重庆理工大学 光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要: 针对微型复杂环境下的物理参数检测, 尤其是涉及折射率 (Refractive Index, RI) 和温度检测需满足的高灵敏度、低成本、抗电磁干扰等要求, 本文提出一种制备简单、结构新颖的椭球状非本征型法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔光纤探针传感器。首先将端面切平的单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 插入陶瓷插芯, 并在 SMF 端面依次固定 UV 胶和氧化石墨烯 (Graphene Oxide, GO) 构成端帽结构的椭球状双 F-P 腔光纤探针传感器。然后对该传感器的 RI 和温度特性进行了理论分析和实验研究。实验结果表明: 在 RI 为 1.353 2~1.391 2 范围内, 随着 RI 增加, 该传感器的干涉光谱发生红移, RI 灵敏度为 119.1 nm/RIU, RI 与波长偏移量的线性相关系数为 0.99; 在 20~60 °C 范围内, 传感器温度灵敏度为 116 pm/°C。本文设计的探针传感器具有结构简单、抗干扰能力强、制作成本低、输出光谱稳定、检测区域小等优点。同时, GO 独特的物理化学属性使其在抗原分子、细菌病毒等生物检测领域具有良好的应用前景。

关键词: 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 氧化石墨烯; 折射率; 温度

中图分类号: O436; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243224.3545

Sensing properties of ellipsoidal extrinsic Fabry-Perot fiber probe

LI Gongye, SHI Shenghui*, LUO Binbin, ZOU Xue, CHEN Jian, ZHAO Mingfu

(Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection,
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: shshill@cqut.edu.cn

Abstract: For the detection of physical parameters in miniature complex environments, especially involving refractive index and temperature detection to meet the requirements of high sensitivity, low cost, anti-electromagnetic interference, etc. In this paper, we proposed an ellipsoidal Fabry-Perot (F-P) cavity fiber optic probe sensor with simple preparation and novel structure. Firstly, a Single Mode Fiber (SMF) with a flat cut end face was inserted into a ceramic ferrule, and UV adhesive and Graphene Oxide (GO) were sequentially fixed on the end face of the SMF to form an ellipsoidal dual F-P cavity fiber probe sensor with an end cap structure. Then the refractive index (RI) and temperature characteristics of the sensor were theoretically analyzed and experimentally investigated. The experimental results show that the interferometric spectrum of this sensor is red-shifted with the increase of RI in the range of 1.353 2 to 1.391 2, and the RI sensitivity is 119.1 nm/RIU, and the linear correlation coefficient between RI and wavelength shift is

收稿日期: 2024-09-08; 修订日期: 2024-10-27.

基金项目: 重庆市自然科学基金创新发展联合基金 (No. CSTB2023NSCQ-LZX0008); 重庆英才青年拔尖人才计划 (No. CSTC2021YCJH -BGZXM0128); 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (No. KJZD-K202201106); 重庆理工大学创新团队 (No. 2023TDZ002); 重庆理工大学研究生创新计划项目 (No. gzlcx20243132)

0.99; in the range of 20~60 °C, the temperature sensitivity of the sensor is 116 pm/°C. The probe sensor designed in this paper has the advantages of simple structure, strong anti-interference ability, low production cost, stable output spectrum and small detection area. Meanwhile, the unique physicochemical properties of GO make it have good application prospects in the field of biological detection of various antigen molecules, bacteria and viruses.

Key words: fiber optic sensors; fabry-perot cavity; graphene oxide; refractive index; temperature

1 引言

光纤 F-P 传感器综合了光纤与 F-P 干涉仪的特点,具有体积小、灵敏度高、不受电磁场干扰等诸多优点^[1-5],因此广泛应用在应变、温度和 RI 等物理量的测量^[6-13]。光纤 F-P 传感器按其结构不同可分为本征型和非本征型两类。Zhang 等^[14]制作了一种飞秒激光微加工 F-P 腔复合膜的光纤相对湿度传感器。实验得到,在 35%~85% 相对湿度 (Relative Humidity, RH) 范围内,当 HA/PVA 配比为 1:2、膜厚为 20 μm 时,传感器灵敏度高达 525 pm/%RH。Yi 等^[15]采用 CO₂ 制作了锥腰直径为 5~6 μm 的锥形本征 F-P 干涉仪,该方法高度可重复。实验得到当腔长为 3 cm 时,锥形 F-P 干涉仪光纤传感器实现了 2×10^{-5} 的最小 RI 传感分辨率。然而,上述方法需要大量加工点的轨迹程序,加工耗时长,也增加了制造的复杂性,同时制作成本也较高。由于非本征 F-P 干涉仪具有精细度高和制作简单等优点,可以通过测量腔长的变化来监测环境参数,因此被广泛应用在工程等领域中。Zhang 等^[16]通过采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 在光纤端面形成端帽结构,制作了一种温度和 RI 同时测量的非本征型光纤 F-P 传感器。实验得到该传感器温度灵敏度为 385.46 pm/°C, RI 灵敏度为 -240.425 dB/RIU, 传感器制备简单且灵敏度较高。吕涛等^[17]实验研究了非本征 F-P 腔光纤液位传感器,得到传感器最大量程为 20 m,精度为 ± 0.5 mm,最小分辨力为 0.3 mm。凌海涛等^[18]将陶瓷套管当作 F-P 的腔体,将贴有钯片的陶瓷插针与连接光纤的插针分别从陶瓷套管两端插入构成非本征光纤 F-P 干涉仪,并应用于氢气测量。实验得到对厚度为 100 μm 的钯片,传感器的灵敏度可达 1.42 nm/%,分辨率约 0.16 nm,对应氢气浓度的探测分辨率可达 2 000 ppm 量级。

GO 是石墨烯的一类常见衍生物,富含羧基、羟基等含氧基团^[19-20],在溶液中有着良好的分散性,因独特的物理化学特性及生物相容性在生物医学领域受到广泛研究^[21-23]。Wang 等^[24]通过在 SMF 插入环氧树脂作为基本干涉介质,在环氧树脂层上先后固定 GO 及 β -CD 形成多层涂覆的非本征光纤 F-P 生物传感器,实验测得其 RI 灵敏度为 70.31 nm/RIU。Liu 等^[25]提出一种鱼精蛋白 (PRTM) 硫酸盐作修饰层,结合 GO 逐层自组装的非本征型光纤 F-P 传感器,实验测得传感器 RI 灵敏度为 43.18 nm/RIU。此类非本征光纤 F-P 传感器具有结构简单、易于制造等特点。然而有关端帽结构的椭球状非本征光纤 F-P 探针的传感特性研究较少,尤其是涉及温度特性的研究。

本文提出并制备了一种基于椭球状非本征 F-P 光纤探针传感器。首先在 SMF 端面固化 UV 胶形成 F-P 腔,GO 膜通过范德华力作用沉积在 UV 胶层外形成双 F-P 腔复合结构的光纤传感器。进一步对该传感器的 RI 和温度响应特性进行了理论分析和实验研究,并通过场发射扫描电子显微镜对该传感器表面形貌进行表征。

2 非本征光纤 F-P 探针制备及原理

2.1 非本征光纤 F-P 探针制备流程

基于椭球状非本征 F-P 光纤探针示意图如图 1(a) 所示,其制作具体流程如图 1(c) 所示:首先,使用细直径光纤切割刀 (Fujikura CT-38) 将普通单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 端面切平整,并将其插入陶瓷插芯,陶瓷插芯的作用是构成支撑结构方便后续光纤 F-P 干涉仪性能测试。随后,采用浸涂法将切平的 SMF 端面浸入紫外光固化聚合物 (UV 胶, NOA-61, 购自 Norland optical 公司) 中,浸入深度控制在 0.05 mm

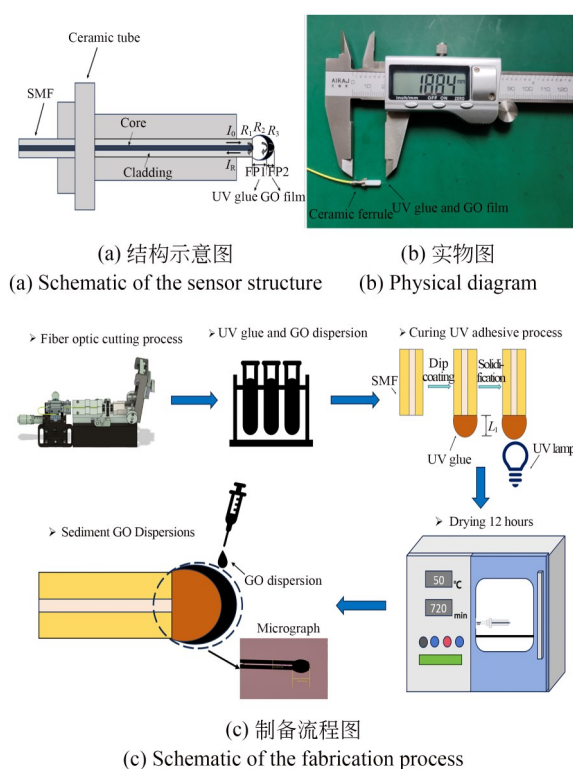


图 1 非本征光纤 F-P 传感器

Fig. 1 Extrinsic Fabry-Perot cavity optical fiber sensors

左右,浸入时间在 1 min 左右,同时适当倾斜光纤角度调整固化的液滴形状,可以使 UV 胶在光纤端面形成类似椭球形状。在实际操作过程中,首先使用带磁性的铁夹夹住 SMF 一端,让其垂直接触 UV 胶液面直至光纤端面附着 UV 胶液滴,然后轻微调整磁铁夹,使 SMF 相对于试管中 UV 胶角度倾斜 25° 左右(由于此时 UV 胶还未固化,倾斜角度过大容易导致光纤端面 UV 胶向四周滴落),让光纤端面与 UV 胶有更大的接触面积,最后采用紫外灯照射固化 5 min 使 UV 胶牢牢固定在 SMF 端面上。

根据 Norland Optical 商家建议,需将固化后 UV 胶置于电热鼓风干燥箱(GZX-9023 MBE),温度设置 50°C 干燥 12 h 使固化的 UV 胶获得最佳黏结特性。接着,用移液器取 $5\ \mu\text{L}$ 的氧化石墨烯(GO,浓度 $1\ \text{mg/ml}$,购自南京先丰纳米材料科技有限公司)分散液均匀滴在传感器端面,在室温下静置干燥 6 h,溶液蒸发后 GO 分散液通过范德华力的作用沉积在 UV 胶层表面,构成 UV-GO 复合结构。制作的探针传感器实物图如图 1(b)所示。由图 1(b)可以看出,整个传感器结构

紧凑、体积小,传感器总长度仅为 18.84 mm。独特的结构使得传感区域更小,在微型空间场合可以实现毫米量级甚至更小范围点的测量。

将制作的传感器连接光源和光谱分析仪,得到传感器在空气中的干涉光谱如图 2 红色曲线所示(彩图见期刊电子版)。当未覆 GO 膜仅在 SMF 端面固化 UV 胶时,此时 SMF 端面与 UV 胶内表面构成单 F-P 腔探针传感器,对应空气中的干涉光谱如图 2 黑色曲线所示。干涉光谱的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为:
$$FSR = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2 \cdot \lambda_1 / (2n_{\text{NOA-61}}L)$$
, λ_1, λ_2 表示两相邻干涉峰(谷)的峰(谷)值波长, L 为微腔的腔长(固化后 UV 胶的厚度)。此时 $FSR = 25.6\ \text{nm}$,选取两相邻波谷值 $1525.9\ \text{nm}$ 和 $1551.5\ \text{nm}$,通过上式计算可得此时 $L = 29.6\ \mu\text{m}$ 。当涂覆 GO 膜后构成双 F-P 腔光纤探针后,对应干涉光谱如图 2 中红色曲线所示。从图 2 中红色曲线可以看出,由于沉积的 GO 薄膜非常薄,使得微腔的长度(FP1+FP2)相比沉积 GO 膜后的改变量很小,因此 FSR 基本不变。在 $1500\sim 1590\ \text{nm}$ 波长范围,涂覆 GO 膜之后,输出光谱的对比度呈现先增大,再减小,又减小的变化情况,光谱对比度最大变化为 $0.73\ \text{dB}$,这种变化规律是无序的。出现增加与减小的交替变化的原因是与 GO 薄膜厚度均匀性有关。由于 GO 表面存在部分褶皱,导致薄膜表面出现不平整的现象,在薄膜均匀且厚度适中的区域,GO 相当于一层反射增强层,提高反

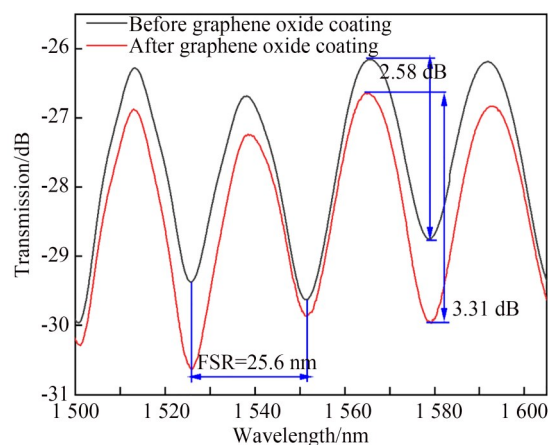


图 2 覆 GO 前后光纤 F-P 探针在空气中的光谱

Fig. 2 Spectra of the fiber F-P probe sensor in air before and after covering GO

射光强度,从而增大光谱对比度;在薄膜厚度不均匀或存在裂纹等区域,可能会吸收更多入射或散射光,导致反射光强度降低,从而使光谱对比度降低。

2.2 传感原理

如图 1(a)所示,入射光会在 SMF 端面(R_1)、UV 胶内表面(R_2)、GO 内表面(R_3)之间发生多次反射和透射。当光反射回 SMF 时,会发生多光束干涉,将多光束干涉简化为三束反射光干涉的情况,此时反射光强可表示为:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi_1 - 2\sqrt{I_2 I_3} \cos \varphi_2 + 2\sqrt{I_1 I_3} \cos \varphi_3, \quad (1)$$

其中, $I_1 \sim I_3$ 分别表示三次反射光的光强,可由式(2)表示(忽略多次反射的贡献):

$$I_n = I_0 \times R_n (n = 1, 2, 3), \quad (2)$$

其中: I_0 为入射光强度, R_1 为光纤端面反射率; R_2 为 UV 胶表面反射率; R_3 为 GO 膜表面反射率,分别由正入射时的菲涅尔反射公式表示:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{(n_{\text{SMF}} - n_{\text{NOA-61}})^2}{(n_{\text{SMF}} + n_{\text{NOA-61}})^2}, \\ R_2 &= \frac{(n_{\text{NOA-61}} - n_{\text{GO}})^2}{(n_{\text{NOA-61}} + n_{\text{GO}})^2}, \\ R_3 &= \frac{(n_{\text{GO}} - n_{\text{E}})^2}{(n_{\text{GO}} + n_{\text{E}})^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $n_{\text{NOA-61}}$ 为 UV 胶的 RI,室温下约为 1.56 RIU; n_{GO} 为 GO 的 RI,约为 1.7 RIU; n_{E} 为外界环境 RI。 $\varphi_1 \sim \varphi_3$ 分别表示相叠加两束光之间的相位差,可由式(4)表示:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{4\pi n_{\text{NOA-61}} L_1}{\lambda}, \\ \varphi_2 &= \frac{4\pi n_{\text{GO}} L_2}{\lambda}, \\ \varphi_3 &= \varphi_1 + \varphi_2, \end{aligned} \quad (4)$$

其中: L_1 和 L_2 分别表示 UV 胶层和 GO 层的厚度; λ 为入射光波长,当 $\varphi_3 = (2m + 1)\pi$ 时(m 为干涉光谱的级次),此时对应干涉消除和信号强度最小。由此干涉产生一系列的波峰和波谷。输出光强波谷值可表示为:

$$\lambda_{\text{dip}}^m = \frac{4(n_{\text{NOA-61}} L_1 + n_{\text{GO}} L_2)}{2m + 1} (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

由式(5)可知,波谷处对应波长值随着

$n_{\text{NOA-61}}, L_1, n_{\text{GO}}, L_2$ 的变化而变化。当探针制备完成且外界温度不发生改变时, $n_{\text{NOA-61}}$ 和 L_1 的数值也不会发生变化。当 n_{E} 发生变化时,由于 GO 具有较大的比表面积及表面富含各种官能团, n_{GO} 也将发生微小变化,导致 λ_{dip}^m 发生改变,从而引起干涉光谱的漂移。

此外,当光纤探针所处外界环境温度发生改变时,UV 胶和 GO 的热光系数 (Thermo-Optic Coefficient, TOC) 以及热膨胀系数 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 将发生变化,UV 胶的 TOC 和 CTE 约为 $10^{-4}/^\circ\text{C}$ 量级;而 GO 的 TOC 约为 $5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, CTE 约为 $6.5 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。此时 $n_{\text{NOA-61}}, L_1, n_{\text{GO}}, L_2$ 的数值都会发生变化,引起 λ_{dip}^m 改变从而导致干涉光谱发生位移,由于 UV 胶的 CTE 比 GO 膜高一个数量级,因此 UV 胶本身体积受热膨胀是变化的主要因素。且光谱位移方向正比于温度的变化。因此,该探针传感器可应用于 RI 和温度传感。

3 实验结果与讨论

3.1 探针表面形貌表征

采用场发射扫描电子显微镜 (SEM, ZEISS SIGMA-HD) 表征所制作传感器表面形貌,结果如图 3 所示。其中,图 3(a) 是 UV 胶通过浸涂固化至光纤端面的 SEM 图,可以看出 UV 胶表面存

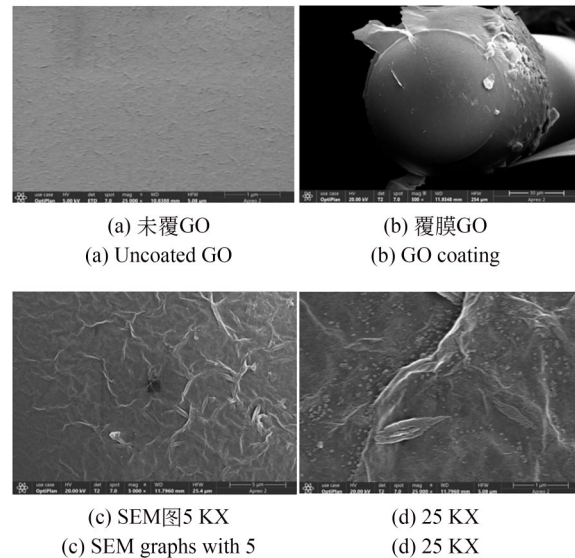


图 3 光纤 F-P 探针表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of the F-P probe

在一些微小纹理或凹凸,这可能与固化条件(光强、时间等)有关。图 3(b)~3(d)是将 GO 分散液通过蒸发沉积在 UV 胶外层形成的复合材料的 SEM 图。可以看出,沉积后的 GO 在光纤侧面及 UV 胶表面有较大的面积覆盖,且存在明显的褶皱区域,这是由 GO 团聚现象所产生的,褶皱可以提高生物分子的固定量,使其在生物检测领域具有良好的应用前景。部分凸起较大的区域是由于 GO 膜的团聚以及固化的 UV 胶表面不平整造成。采用蒸发沉积在 UV 胶层涂覆 GO 薄膜方法简单,并且效果较好。

图 4 给出了光纤 F-P 探针表面的能谱图,其对应元素成分如表 1 所示。由表 1 可知,探针表面存在 C 元素、O 元素以及 S 元素,且对应元素质量百分比分别为 33.24%,33.17% 和 33.59%,其中 C 元素和 O 元素是来自 UV 胶表面 GO 膜,少部分 C 元素和 S 元素来 UV 胶。这些结果表明 GO 膜可以通过范德华力的作用沉积于 UV 胶的表面。

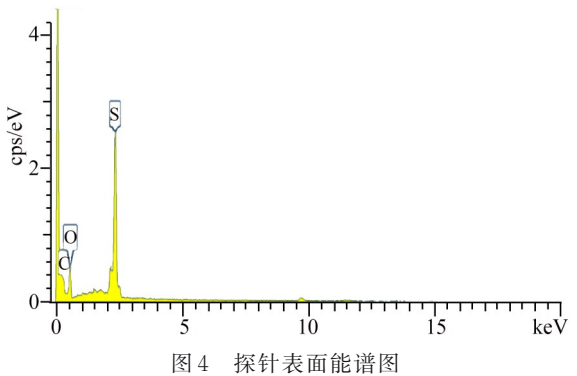


Fig. 4 Energy spectrum of the probe surface

表 1 F-P 探针表面元素成分表

Tab. 1 Surface elemental composition of the F-P probe(%)

Chemical element	Weight percentage	Atomic percentage
C	33.24	47.00
O	33.17	35.21
S	33.59	17.79
Amount	100.00	100.00

3.2 折射率测试

RI 测试实验系统由全波段 ASE 宽带光源 (KG-ASE-D-1-1-FA, 1 200~1 600 nm)、光谱分析仪 (OSA, Yokogawa, AQ6370D)、光纤环形器、光纤 F-P 传感器以及自制的可升降平台共同

组成。图 5(a)和(b)分别给出了 RI 测试系统示意图和对应实物图。宽带光源发出的光被耦合进光纤,经过光环形器进入传感 F-P 腔,经探针传感器反射回的干涉光谱信号再次经过光环形器耦合进入 OSA 中并观察光谱的变化。在进行传感器 RI 测量实验前,首先配制不同浓度的蔗糖溶液(质量分数为 5%~30%)以得到具有不同 RI 的溶液。接着利用阿贝折射仪(NAR-1T solid, ATAGO, 日本,可测量 RI 为 1.300 0~1.700 0,精度为±0.000 2)对溶液的 RI 进行标定,测得不同浓度的溶液 RI 分别为 1.352 3~1.391 2。最后将制备好的传感器探头置于配制好的溶液中,并通过自制可升降平台控制每次测试时传感探头浸入液体深度一致,待光谱稳定后分别记录每组数据。需要注意的是,为保证每次测量准确性,实验过程保持外界环境温度恒定,同时每组实验结束后取出传感器探头并用无水乙醇和超纯水彻底冲洗并干燥。

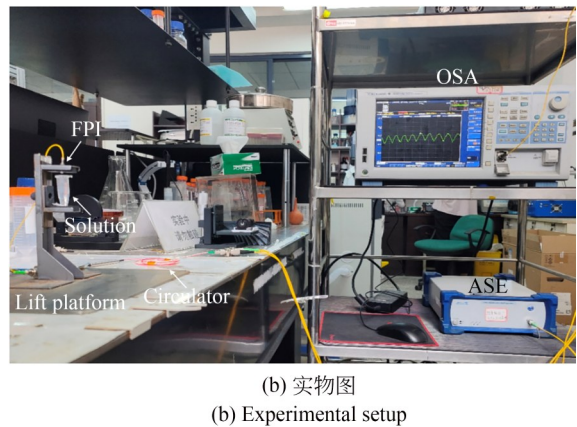
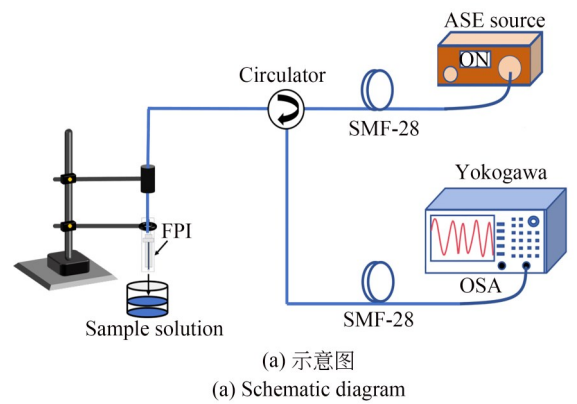
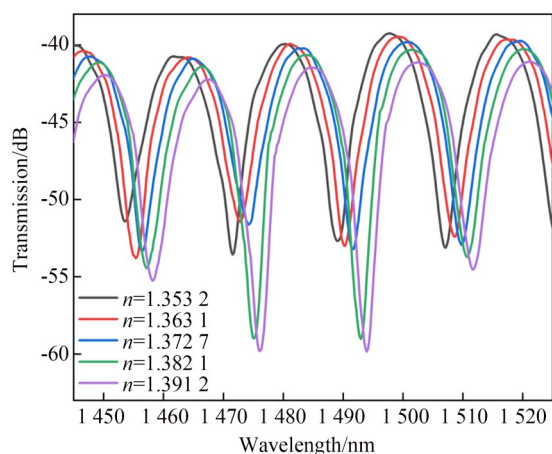
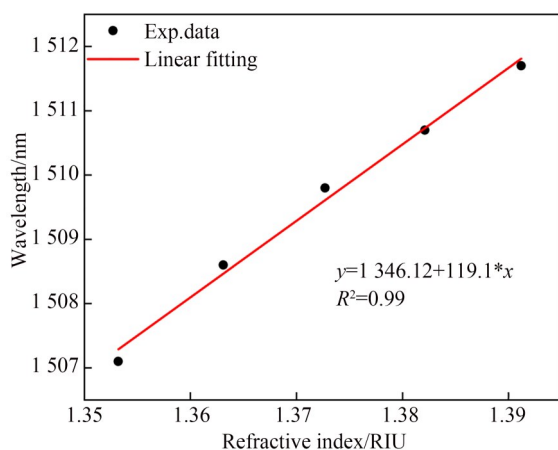


图 5 RI 测试实验系统
Fig. 5 Diagram of RI testing system

图 6(a)给出了传感器干涉光谱随蔗糖溶液 RI 的变化关系。由图 6(a)可知,输出光谱随 RI 增大而向长波长方向移动,这是因为随着 RI 增大,导致相干光的相位差增大。由式(4)和式(5)可知,当相位差增大时,为了保持干涉相消,光的波长会相应增加,对应干涉光谱的红移。图 6(b)给出了传感器谐振波长随 RI 的变化曲线,在 RI 1.352 3~1.391 2 范围内,波长漂移总量为 4.6 nm,对应 RI 灵敏度为 119.1 nm/RIU,线性相关度 $R^2=0.99$ 。实验所使用 OSA 的分辨率为 0.02 nm,因此,计算得到该传感器 RI 检测分辨率约为 1.7×10^{-4} RIU。



(a) 传感器随 RI 变化的光谱响应
(a) Spectral response of the sensor with RI

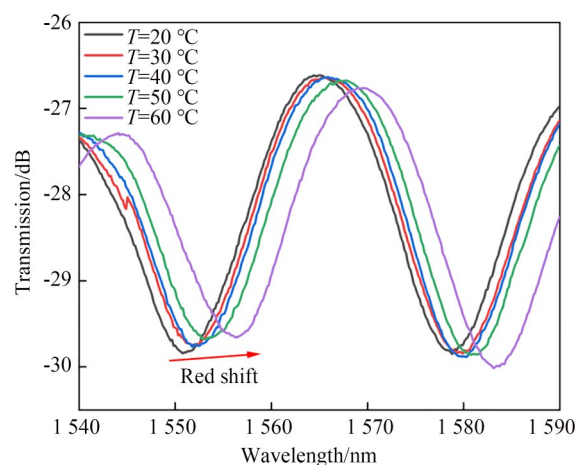


(b) RI 灵敏度线性拟合
(b) Linear fitting results for RI sensitivity

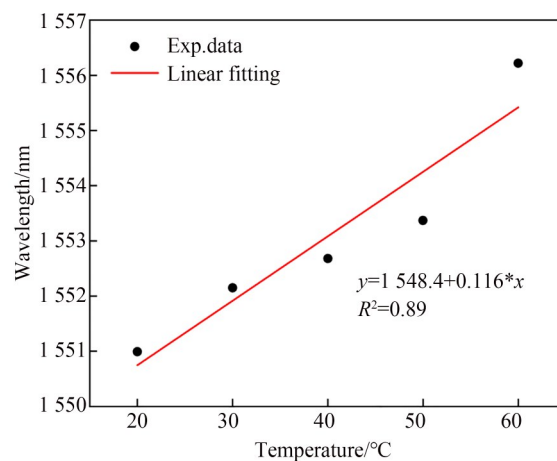
图 6 传感器光谱随 RI 变化的光谱及拟合
Fig. 6 Spectral correspondence and linear fitting for RI sensitivity

3.3 温度测试

将图 5 所示实验系统中的可升降平台替换为恒温恒湿箱 (SHSHB-D6000, 工作温度范围为 5~60 °C), 其作用主要用以调节温度的变化。在进行温度测试前, 先将传感器端面清洗并风干, 保持其他环境因素恒定以免干扰造成误差影响实验准确性。然后将传感器用防水胶带贴在载玻片上置于恒温恒湿箱内, 为了使传感器的最低工作温度接近环境温度, 设置测试的温度范围为 20~60 °C, 每间隔 10 °C 待光谱稳定记录一组数据。图 7(a) 给出了探针所处环境温度发生变化其输出光谱的变化关系, 在 20~60 °C 温度范围



(a) 传感器光谱随 RI 变化
(a) Spectral response of the sensor with temperature



(b) 温度灵敏度线性拟合
(b) Linear fitting results for temperature sensitivity

图 7 传感器随温度变化的光谱响应及拟合
Fig. 7 Spectral correspondence and linear fitting for temperature sensitivity

内,探针的输出光谱随温度升高而发生红移。由于 GO 表面存在一些褶皱,输出光谱波形存在更多锯齿状干扰,且当温度从 50 ℃升高为 60 ℃时输出光谱波形存在一个明显大于之前变化率的漂移跳变,这导致探针的温度灵敏度拟合线性度降低。考虑热应力与应变的作用,当温度升高时,由于 GO 和 UV 胶之间的热膨胀系数差异,会产生热应力。这种热应力使得光纤、UV 胶、GO 间出现微小形变,从而影响传感器的腔长和 RI。当温度升高到某个临界点时,热应力突然释放或重新分布,导致此刻光谱存在大于之前变化率的跳变存在一定的应力,当温度升高到一定程度,应力逐渐释放,引起此刻光谱较大的漂移。从图 7(b)给出了谐振波长随温度的变化曲线,在 20~

60 ℃温度范围,探针的温度灵敏度为 116 pm/℃,对应检测分辨率为 0.17 ℃。

3.4 稳定性测试

为了验证传感器的稳定性,将温湿度箱内温度设置为 25 ℃,同时将探针端面浸入纯水(RI=1.333)中然后置于温湿度箱内,连接 ASE 宽带光源和 OSA。待输出光谱稳定后,在一小时内间隔 15 min 记录一组数据。传感器的输出光谱随时间变化关系如图 8 所示。可以看出,传感器在上述环境条件下的波长位移非常小,最大波长偏移量仅为 0.11 nm,说明水分子长时间累积不会引起干涉光谱的较大漂移,证明传感器有着良好的稳定性。表 2 给出了所提出的探针传感器与其他类似结构光纤 F-P 传感器的性能比较。

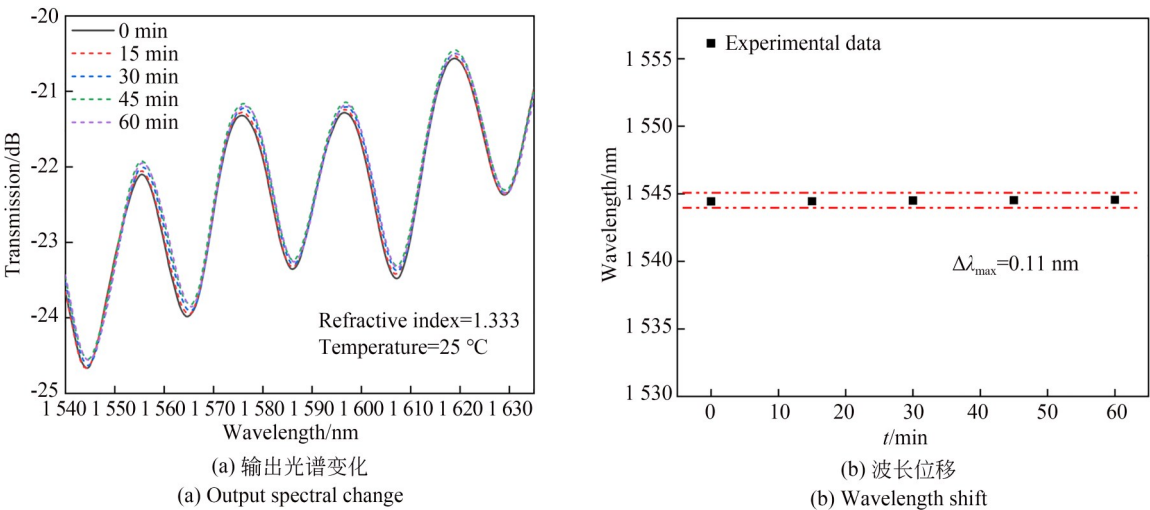


图 8 传感器稳定性测试
Fig. 8 Stability test results

表 2 与其他不同结构光纤 F-P 传感器性能比较

Tab. 2 Performance comparison with other fiber optic F-P sensors with different structures

Structure	RI Sensitivity/RIU	Range of RI/RIU	Temperature Sensitivity/(pm•℃ ⁻¹)	Range of Temperature/℃	Reference
SMF/Au/SMF	-43.59 dB/RIU	1.300 0~1.456 0	13	25~800	[13]
SMF/PDMS	-240.425 dB/RIU	1.362 5~1.415 0	385.46	25~60	[16]
SMF/ER/GO/β-CD	70.31 nm/RIU	1.332 1~1.369 4	Not mentioned	—	[24]
SMF/ER/GO/PRTM	43.18 nm/RIU	1.340 9~1.375 9	Not mentioned	—	[25]
SMF/NOA-61/GO	119.1 nm/RIU	1.353 2~1.391 2	116	20~60	This work

4 结 论

基于多光束干涉理论,提出了一种简单新

颖的椭球状非本征光纤 F-P 探针传感器制备方法。首先通过在 SMF 端面浸涂固化 UV 胶,进一步在其表面通过范德华力的作用蒸发沉积

GO 薄膜构成椭球状复合 F-P 腔的光纤传感器。实验结果表明:在 RI 为 1.353 2~1.391 2 和温度为 20~60 °C 的范围内,传感器的干涉光谱均发生红移,其对应灵敏度分别为 119.1 nm/RIU 和 116 pm/°C,对应检测分辨率为 1.7×10^{-4} RIU 和 0.17 °C。该传感器具有输出光谱稳定、结构紧凑、制备简单可靠、抗干扰能力强等优点。

在未来的工作中,将进一步优化 GO 膜的涂覆工艺,以改善传感器性能的稳定性。同时通过将 GO 作为生物界面连接层,利用其表面丰富的含氧官能团为该传感器提供丰富的结合位点,进一步扩展该传感器在如:有机小分子、抗体/抗原、生物标记物检测等生物医学检测中的应用。

参考文献:

- [1] 陈茂庆,刘思源,蔡露,等. 基于双光子聚合 3D 打印的光纤法珀微波导腔制备及传感特性研究[J]. 光学学报, 2024, 44(2): 0206002.
CHEN M Q, LIU S Y, CAI L, *et al.* Fabrication and sensing characteristics of optical fiber fabry-perot micro-waveguide cavity based on two-photon polymerization 3D printing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(2): 0206002. (in Chinese)
- [2] 龚元,郭宇,饶云江,等. 光纤法布里-珀罗复合结构折射率传感器的灵敏度分析[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 298-303.
GONG Y, GUO Y, RAO Y J, *et al.* Sensitivity analysis of hybrid fiber Fabry-Pérot refractive-index sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 298-303. (in Chinese)
- [3] ZHENG H K, ZHAO Y, LV R Q, *et al.* Reflective optical fiber sensor based on dual fabry perot cavities for simultaneous measurement of salinity and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(24): 27495-27502.
- [4] XUE D, ZHANG H X, WANG S, *et al.* High sensitivity composite F-P cavity fiber optic sensor based on MEMS for temperature and salinity measurement of seawater[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 33241-33252.
- [5] MA J W, WU S, CHENG H H, *et al.* Sensitivity-enhanced temperature sensor based on encapsulated S-taper fiber Modal interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106933.
- [6] 罗春晖,陈晓旭,吴舜. 基于游标效应的并联法布里-珀罗干涉仪传感特性的分析[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0506002.
LUO C H, CHEN X X, WU S. Analysis of sensing characteristics of parallel fabry-Pérot interferometer based on vernier effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 0506002. (in Chinese)
- [7] CHEN L, TIAN J J, WU Q, *et al.* Composite Fabry-Perot interferometric gas pressure and temperature sensor utilizing four hole fiber with sensitivity boosted by high-order harmonic Vernier effect[J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 24988-25003.
- [8] GUO Z W, WANG Y N, LI J. Compact strain fiber sensor based on Fabry-Perot microstructural air cavity[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2022, 50(4): 385-396.
- [9] SHABAHANG F, SMITH S T. Multi-axis modulated compact fiber-based Fabry-Perot interferometric probe[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(10): 2768-2774.
- [10] 林子曦,李雨婷,杨玉强,等. 基于增强型谐波游标效应的光纤温度传感器[J]. 光学精密工程, 2024, 32(15): 2344-2354.
LIN Z X, LI Y T, YANG Y Q, *et al.* Fiber optic temperature sensor based on enhanced harmonic vernier effect[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(15): 2344-2354. (in Chinese)
- [11] CANO-CONTRERAS M, GUZMAN-CHAVEZ A D, MATA-CHAVEZ R I, *et al.* All-fiber curvature sensor based on an abrupt tapered fiber and a fabry-Pérot interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2213-2216.
- [12] HE T Y, CHEN M Q, ZHAO Y, *et al.* Optical fiber Fabry-Perot silica-microprobe for a gas pressure sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108106.
- [13] ZHANG C, YANG D, MIAO C Y, *et al.* Large-range refractive index measurement method for open cavity Fabry-Pérot interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(3): 035101.
- [14] ZHANG Z X, GONG H P, YU C G, *et al.* An optical fiber humidity sensor based on femtosecond laser micromachining Fabry-Perot cavity with composite film[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022,

- 150: 107949.
- [15] YI X R, LI Y Q, ZHAO K H, *et al.* CO₂Laser tapering of intrinsic fabry-perot interferometers for sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(6): 5824-5830.
- [16] ZHANG X Y, YU Y S, ZHU C C, *et al.* Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 26(1): 7-10.
- [17] 吕涛, 刘德森, 何开华. 非本征敏感法布里-珀罗腔高精度光纤液位传感器输出特性[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1614-1618.
- LÜ T, LIU D S, HE K H. Output characteristics of high-precision optical fiber liquid-level sensor based on extrinsic and sensitive fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26 (11): 1614-1618. (in Chinese)
- [18] 凌海涛. 基于非本征法布里-珀罗干涉仪的光纤氢气传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- LING H T. *Research on Fiber-Optic Hydrogen Sensor Based on Extrinsic Fabry-Perot Interferometer*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 刘译泽, 江俊峰, 刘琨, 等. 氧化石墨烯涂覆的空心微腔回音壁谐振模气体传感器[J]. 光学学报, 2024, 44(7): 0728004.
- LIU Y Z, JIANG J F, LIU K, *et al.* Gas sensor based on graphene oxide-coated hollow microbubble whisper gallery resonant mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(7): 0728004. (in Chinese)
- [20] WANG L, XIONG Q R, XIAO F, *et al.* 2D nanomaterials based electrochemical biosensors for cancer diagnosis [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 89(Pt 1): 136-151.
- [21] KUMAR GUPTA V, CHOUDHARY K, KUMAR S. SMS fiber structure-based enzymatic sensor probe for uric acid detection using gold nanoparticles and graphene oxide[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(9): 14129-14136.
- [22] SUN Y Z, GUO X X, MORENO Y, *et al.* Sensitivity tunable biosensor based on graphene oxide coated excessively tilted fiber grating [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2022, 351: 130832.
- [23] DONG J, SANG M, WANG S, *et al.* Ultrasensitive label-free biosensor based on the graphene-oxide-coated-U-bent long-period fiber grating inscribed in a two-mode fiber[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2021, 39(12): 4013-4019.
- [24] WANG R D, YAN M L, JIANG M, *et al.* Label-free and selective cholesterol detection based on multilayer functional structure coated fiber fabry-perot interferometer probe [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1252: 341051.
- [25] LIU B B, LI Y S, WANG R D, *et al.* Label-free and selective heparin detection by surface functionalized fiber Fabry-Perot interferometer biosensor [J]. *Optical Fiber Technology*, 2024, 84: 103770.
- [26] JIA P G, FANG G C, LIANG T, *et al.* Temperature-compensated fiber-optic Fabry - Perot interferometric gas refractive-index sensor based on hollow silica tube for high-temperature application[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 244: 226-232.

作者简介:



李恭焯(2000—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail:1976579479@qq.com

通讯作者:



石胜辉(1980—),男,重庆人,博士,副教授,硕士生导师,2005年于长春理工大学获得学士学位,2008年、2013年分别于昆明理工大学、电子科技大学获得硕士和博士学位,主要从事光学传感和检测技术的研究。E-mail: shshill@cqu.edu.cn