



·前沿技术与交叉科学·

## 基于空气孔微结构光纤的表面等离子体 共振折射率传感器\*

谭启龙, 张 夏, 康 虎, 彭志清, 李筱薇, 杨莫愁, 冯国英

(四川大学 电子信息学院, 激光微纳工程研究所, 成都 610065)

**摘 要:** 提出了一种基于表面等离子体共振 (SPR) 效应增强的光子晶体光纤折射率传感器。该传感器结构通过光纤熔接机拼接光子晶体光纤 (PCF), 在光子晶体光纤中间引入一个空气孔形成 PCF-空气孔-PCF 的光纤传感结构, 随后使用磁控溅射镀膜工艺在其表面沉积一层薄金膜制备而成。实验探究了折射率及温度对传感器的响应。结果表明, 在 1.333~1.389 的折射率范围内, 所提出的传感器的平均折射率灵敏度为 2 142.52 nm, 且测量线性度为 0.981, 品质因子约 13.10。实验结果表明该传感器对温度不敏感。相比于无空气孔的 PCF 传感结构, 引入的空气孔增强了 SPR 效应, 使得传感器拥有良好的共振峰深度。得益于上述优势, 该类型传感器有望在生物医学、环境监测等领域得到应用。

**关键词:** 表面等离子体共振; 光子晶体光纤; 光纤传感; 空气孔

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220062

## Surface plasmon resonance refractive index sensor based on microstructured fiber with air-hole

Tan Qilong, Zhang Xia, Kang Hu, Peng Zhiqing, Li Xiaowei, Yang Mochou, Feng Guoying

(Institute of Laser Micro-Nano Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A photonic crystal fiber refractive index (RI) sensor based on enhanced surface plasmon resonance (SPR) effect is proposed. The sensor structure is spliced with a photonic crystal fiber (PCF) by a fiber fusion splicer, so that an air hole is introduced in the middle of the photonic crystal fiber to form a PCF-air hole-PCF optical fiber sensing structure. Then, a thin gold film is deposited on its surface by using magnetron sputtering coating process. Experiments are carried out to investigate the response of the refractive index and temperature of the sensor. The results show that in the refractive index (RI) range of 1.333–1.389, the sensor has an average RI sensitivity of 2 142.52 nm, with a linearity of 0.981 and a quality factor about 13.10. Experimental results show that the sensor is not sensitive to temperature. Compared with the PCF sensing structure without air hole, the air hole introduced enhances the SPR effect, so that the sensor has a good resonance peak depth. Benefiting from the above advantages, this type of sensor is expected to be applied in fields such as biomedicine and environmental monitoring.

**Key words:** surface plasmon resonance, photonic crystal fiber, fiber-optic sensors, air hole

材料的折射率(RI)是生物医学、环境科学等多个领域应用中需要监测的重要参数, 光纤 RI 传感器因具有灵敏度高、结构紧凑、实时响应等优势, 受到了研究者的广泛研究<sup>[1]</sup>。当前, 开发了多种用于检测 RI 的光纤传感结构, 例如马赫-曾德干涉结构<sup>[2-5]</sup>、法布里-珀罗干涉结构<sup>[6]</sup>及迈克尔逊干涉结构<sup>[7]</sup>。具有周期性排列且沿光纤长度方向延伸气孔的光子晶体光纤由于新颖的光学特性, 应用于 RI 传感的研究已见报道<sup>[8-9]</sup>。例如, 2006 年, 加拿大蒙特利尔综合理工学院的 Hassani 等人<sup>[10]</sup>首次提出基于微结构的表面等离子体共振 (SPR) 传感器结构, 该结构是由两层尺寸不同的空气孔按正六边形规则排列组成, 外层空气孔内壁覆一层金膜作为 SPR 激发层, 孔内注入待测介质, 该传感器

\* 收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 等离子体物理重点实验室基金项目 (6142A04200210); 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目 (U1730141)

联系方式: 谭启龙, 2018222059275@stu.scu.edu.cn。

通信作者: 冯国英, guoing\_feng@scu.edu.cn。

的折射率灵敏度可达到 520 nm; 新加坡南洋理工大学的 Tan 等人<sup>[11]</sup> 使用冷转移技术将石墨烯沉积在光子晶体光纤 (PCF) 表面制备了 RI 传感器, 在 1.33~1.38 范围的 RI 获得了 9.4 dB 灵敏度。在光纤传感器中引入微结构(如拉锥<sup>[12]</sup>、空气腔<sup>[13]</sup>)能有效提高传感器的性能。东北大学<sup>[14]</sup> 将单模光纤-PCF-单模光纤传感结构中的 PCF 进行拉锥, 使得倏逝场增强, 将 RI 的最大灵敏度提高了 1.73 倍。在 RI 为 1.373 7 时, 得到了 281.6 nm 的灵敏度。SPR 技术具有高灵敏度、无标记、能实时高精度地检测动态反应过程等优势<sup>[15]</sup>。研究者们致力于将 SPR 技术与光子晶体光纤传感技术结合, 进一步提高 RI 传感器灵敏度。东北大学<sup>[16]</sup> 提出了一种基于 SPR 效应的增敏型 PCF 传感器。在 PCF 表面涂覆金膜激发 SPR 效应, 继而使用氧化石墨烯修饰, 使得传感器的 RI 灵敏度提高了约 1.68 倍, 达到了 4 649.8 nm。

国内外已经报道了光纤 SPR 折射率传感器在生化分析<sup>[17]</sup>、环境检测<sup>[18]</sup> 等多个领域的应用。在生化分析领域, 天津大学<sup>[19]</sup> 通过化学镀金的方式在光纤表面沉积金薄膜, 并对 RI 为 1.333 至 1.386 范围内的溶液进行检测。随后在传感器表面交联抗体蛋白用于人体 IgG 浓度测量, 实验测得对 IgG 的灵敏度为 0.41  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。东北大学<sup>[20]</sup> 制备了异芯结构的双通道传感器, 并测量了 RI 在 1.332 3~1.335 9 范围内的灵敏度。随后增加了抗体蛋白的调制层, 实现了对人体 IgG 选择性检测的功能, 灵敏度约为 1.36  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。他们还制备了反射式光纤 SPR 传感探头, 在 1.332 6~1.376 1 的 RI 范围内的灵敏度为 2 108.6 nm<sup>[21]</sup>。在传感表面交联一层葡萄糖敏感膜后, 传感器在葡萄糖为 0 至 0.5 mg/mL 的浓度范围内获得了 85.4 mg/mL 的高灵敏度。环境检测方面, 武汉理工大学<sup>[22]</sup> 提出了一种基于 PCF 的光纤 SPR 传感器, 在 RI 为 1.390 4 附近时的灵敏度为 4 613.73 nm。将其表面涂覆一层温度敏感膜后, 获得了 -1.551 nm/ $^{\circ}\text{C}$  的温度灵敏度。东北大学提出了一款基于异芯结构的反射式光纤 SPR 传感器并用于汞离子浓度的检测<sup>[23]</sup>。对于 RI 为 1.333 0 至 1.378 7 范围内的溶液, 传感器的平均灵敏度为 2 110.33 nm。在传感单元区域涂覆汞离子敏感膜后, 该传感器的检测灵敏度高达 0.558 6 nm/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ 。

本文提出了一种基于空气孔微结构光纤的 SPR 折射率传感器。通过多模光纤之间插入一段 PCF 作为传感单元, 并使用熔接机拼接 PCF 引入微结构(空气孔)。传统的光纤制备空气孔方法, 包括采用腐蚀性极强的 HF 刻蚀光纤<sup>[24]</sup>、采用汽化甘油涂覆镀膜<sup>[25]</sup>、手动熔接空芯光纤<sup>[26]</sup>、飞秒激光加工<sup>[6]</sup> 等, 操作复杂繁琐且成功率低。通过光纤熔接机的自动模式熔接大空气孔径的六孔柚子型 PCF 制备空气孔, 方法简单易实现, 不需要高昂设备或复杂手段。我们分析了传感器对 RI 和温度的响应, 在 1.333~1.389 的 RI 范围内, 所提出的传感器表现出 2 142.52 nm 的灵敏度, 且呈良好线性关系。传感器的温度灵敏度极低, 因此在实际 RI 传感测量过程中, 可忽略环境温度对 RI 传感结果的影响。随后, 比较了 4 种不同异芯结构传感器的 SPR 光谱, 对比发现, 引入了空气孔的 PCF 传感器的 SPR 共振峰深度得到了极大提升, 改善了传感器的测量性能。

## 1 传感原理及结构制备

对于异芯结构的光纤 SPR 传感器, 由于光在传输过程中能量会从纤芯泄露到包层, 进而在包层与金属分界面发生衰减全反射现象。其中包层中的单次衰减全反射类似于 Krestschmann 棱镜模型, 可采用 Krestschmann 棱镜 SPR 理论对传感器进行分析<sup>[27]</sup>。当金膜厚度小于倏逝波穿透深度时, 倏逝波能够穿透金膜存在于金属与待测介质的界面。因此光波波矢在传输方向( $z$  轴)上的分量可以表示为<sup>[28]</sup>

$$k_z = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \sin\theta \quad (1)$$

式中:  $\omega$  表示入射光角频率;  $c$  为真空中的光速;  $\varepsilon_0$  为光纤包层的介电常数;  $\theta$  表示入射角度。由该式可知, 沿金属界面传播的波矢分量与包层的介电常数和入射角有关。在金膜与待测介质的界面上, 金膜受到倏逝波的激发, 产生沿着金属表面传播的电磁波, 被称为表面等离子体波 (SPW)。根据麦克斯韦方程和相关边界条件, 有

$$k_{\text{spw}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}} \quad (2)$$

式中:  $k_{\text{spw}}$  为表面等离子体波波矢大小;  $\varepsilon_m$  为金属的介电常数;  $\varepsilon_s$  为待测介质的介电常数。当  $k_{\text{spw}}$  等于  $k_z$  时, 光波被金属材料吸收的能量达到最大, 产生的等离子体共振效应最强, 因此相位匹配条件为

$$k_z = k_{\text{spw}} \quad (3)$$

当满足上式时, 则会发生表面等离子体共振效应, 在共振波长处能量损耗达到最大, 在透射谱上则表现出吸收峰。当待测样品的 RI 发生改变时, 所对应的共振波长则会根据相位匹配条件而发生变化, 因此可以通过检测共振波长的偏移情况检测外界 RI 变化。

所提出的传感器结构示意图如图 1(a) 所示, 该结构通过在两段多模光纤 (62.5/125  $\mu\text{m}$ ) 之间插入两段商用的六孔柚子型 PCF 并引入一个空气孔, 并使用磁控溅射镀膜工艺在该结构表面沉积金薄膜。所用的 PCF 参数分别为包层直径 124.6  $\mu\text{m}$ , 纤芯直径 6.2  $\mu\text{m}$ , 微孔直径 13.3  $\mu\text{m}$ 。图 1(b) 显示了使用光纤熔接机在两段 PCF 之间引入空气孔的制备结果。图 1(c) 显示了在光学显微镜下 PCF 之间的塌陷区产生的空气孔。图 1(d) 展示了所使用的 PCF 光学显微镜图。值得注意的是, 多模光纤与 PCF 熔接处也会产生一个塌陷区。当光从多模光纤的纤芯传输到塌陷区时, 会使得光从纤芯泄露到 PCF 的包层, 在 PCF 的包层与金属薄膜界面处发生全反射从而激发表面等离子体波<sup>[22]</sup>。引入的空气孔等效于光疏介质, 包层中的光入射到该孔时会发生反射及折射现象<sup>[24]</sup>, 增加了光在包层与金属界面的反射次数, 将导致 SPR 共振吸收峰的深度增加。

使用光纤熔接机 (88S, 藤仓) 及配套的切割刀 (CT50, 藤仓) 制备上述光纤结构。将熔接模式调整为自动熔接, 结构制备过程如图 2 所示。首先将两段 PCF 熔接, 引入塌陷区及封闭的空气孔, 示意图如图 2(a) 所示。随后将 PCF 另外一个平整的端面与多模光纤端面熔接, 如图 2(b) 所示。然后重复该过程即可将另一端 PCF 的端面与多模光纤熔接, 光纤结构制备完成, 随后使用磁控溅射镀膜工艺在含有结构的光纤表面沉积一层金薄膜, 如图 2(c) 所示。图 2(d) 展示了所制备的镀金光纤示意图。相比于传统四种制备空气孔的方法, 本文使用自动熔接机拼接大孔径 PCF 制备空气孔的方法更简单。此外本文所提出的传感器在传统的异芯结构基础上进行变形, 极大地保留传统异芯结构的强机械性能。

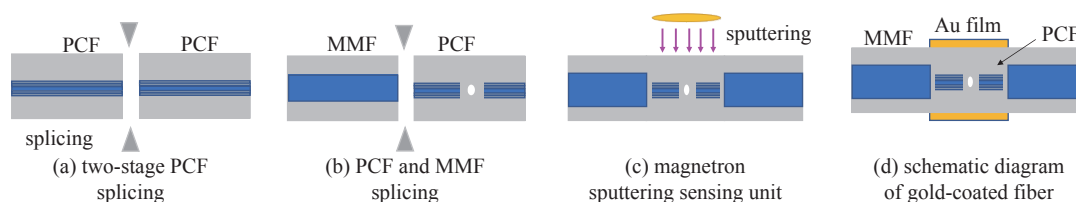


Fig. 2 Structure and preparation process of the sensor

图 2 传感器的结构制备流程

## 2 实验及分析

### 2.1 传感系统

传感系统的示意图如图 3 所示。该系统主要由 LSH-T75 型号卤素灯 (光谱范围 300~2500 nm)、光纤传感单元、SET 高精度数显恒温平台、ATP5020 型号光谱仪 (320~1130 nm) 及计算机构成。使用移液枪将定量的 RI 溶液缓慢滴于传感单元, 由卤素灯产生的宽谱光源通过光纤传感单元, 由光谱仪收集输出光谱并传输给计算机进行数据的记录和分析。

### 2.2 镀金厚度对传感器的影响

不同的金膜厚度对传感器的性能会产生影响<sup>[29]</sup>。光纤 SPR 传感器的金属层厚度常控制在 40~60 nm 之间, 以更好地激发 SPR 效应<sup>[30]</sup>。本文将溅射仪的真空度设置为 3.3 Pa, 溅射电流设为 30 mA, 在该参数下传感器对金膜的沉积速率约 0.4 nm/s。由于溅射时长不同会引起金膜厚度不同, 将磁控溅射仪设置不同的溅射时间 (30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 150 s) 以研究传感器对不同金膜厚度的 SPR 响应, 结果如图 4 所示。由图可知, 传感器在 105 s 或 120 s 时能够获得较好的 SPR 共振峰深度。考虑到制作成本以及共振峰深度能改善传感器检测精度, 本文使用 105 s 作为金薄膜沉积时间, 金膜厚度约 42 nm。

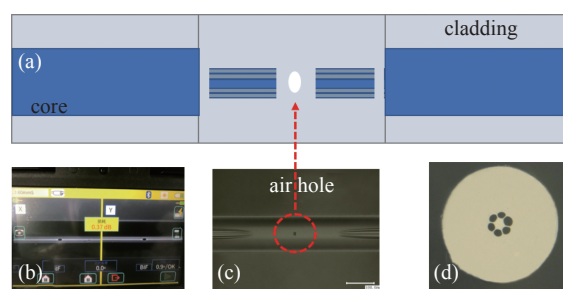


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the sensing structure, (b) splicing diagram of air holes introduced between PCFs, (c) optical microscope image of the collapsed area and air holes between two PCFs, (d) surface microscopic image of the grapefruit-shaped PCF end

图 1 (a) 传感结构示意图、(b) PCF 之间引入空气孔的熔接图、(c) 两段 PCF 之间塌陷区及空气孔的光学显微镜图像、(d) 柚子型 PCF 端面显微镜图

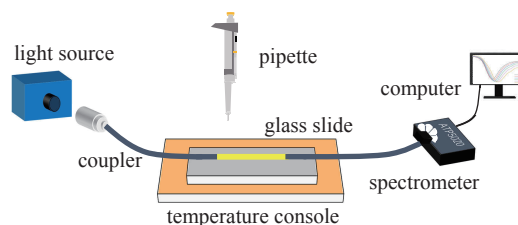


Fig. 3 Schematic diagram of the sensing system

图 3 传感系统示意图

### 2.3 传感器对 RI 的响应

由图 5 所示,探究外界环境 RI 对传感器的性能影响。本实验将空气谱作为参考光谱,测得 RI 液的光谱作为 SPR 样品谱。为模拟不同的水溶液环境,恒温恒湿条件下使用葡萄糖制备了样品 RI 分别为 1.333, 1.340, 1.347, 1.355, 1.363, 1.371, 1.380 和 1.389 的溶液<sup>[27]</sup>。该范围已将大多数水溶液所对应的 RI 囊括在内,以此保证传感器的实际应用需求。随后将溶液滴至光纤传感单元。从图 5(a)可知,随着环境 RI 的升高,传感器的 SPR 共振波长整体向长波长方向移动(红移),共振波长从 591.58 nm 移动到了 712.54 nm 处,共移动了 120.96 nm。

从图 5(b)中可知,共振波长偏移量与 RI 拟合关系如下

$$\Delta\lambda = 2142.52n - 2862.45 \quad (4)$$

式中:  $\Delta\lambda$  表示共振波长偏移量;  $n$  表示折射率。由此可知,在 1.333~1.389 的 RI 范围内,所提出的传感器的平均灵敏度为 2142.52 nm,并且波长偏移与 RI 之间表现出良好的线性关系,拟合系数高达 0.981。

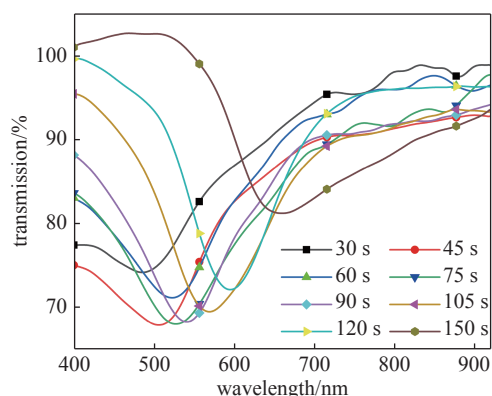
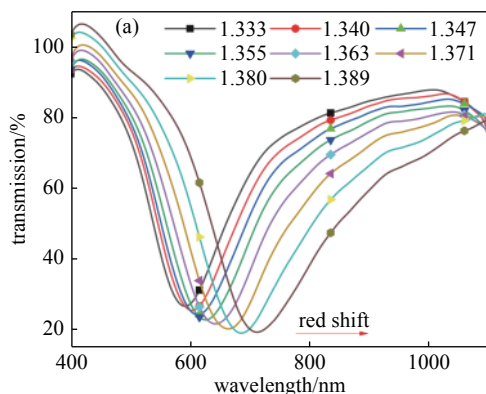


Fig. 4 Effect of different sputtering time on the sensor  
图 4 不同溅射时长对传感器的影响

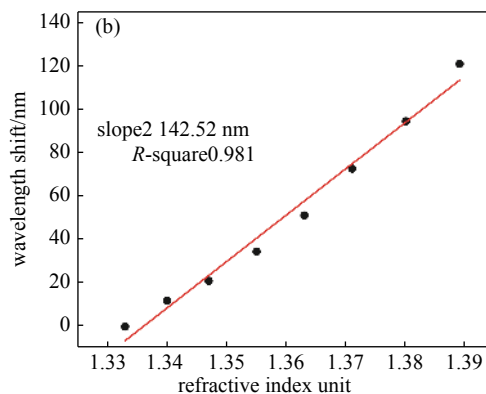


Fig. 5 SPR transmission spectra of the sensor and relationship between wavelength shift and refractive index

图 5 传感器的 SPR 透射光谱及波长偏移与折射率的关系

### 2.4 共振峰深度

将本文提出的传感器(MPHPM)与已报道的三种异芯结构光纤 SPR 传感器的透射谱进行比较,即多模-单模-多模(MSM)结构、多模-光子晶体-多模(MPM)结构、多模-光子晶体-光子晶体-多模(MPPM)结构,结果如图 6 所示。图 6 显示了 4 种不同异芯结构传感器在 RI 为 1.333 处的 SPR 共振峰深度。从图中可以观察到,本文提出的传感器共振深度远超出了上述其他传感器的深度,深度约 67%,品质因子达到了 13.10。可能是由于引入了一个封闭的空气孔,使得入射到该孔的光发生反射及折射,增加了光在包层与金属界面的全反射次数,进一步激发位于金属与电介质界面处的表面等离子体波,使得能量吸收得更多,从而在 SPR 透射谱中显示出更深的深度。这同时意味着共振波长获得更容易且精准,改善了传感器的性能。

### 2.5 温度响应

为探究温度是否对传感器产生影响,实验中记录了不同温度下的传感器共振波长的变化情况。每次通过温控台将温度升高至指定数值时,等待光谱稳定后记录光谱。图 7 显示了该传感器对不同温度的响应光谱。从图 7(a)

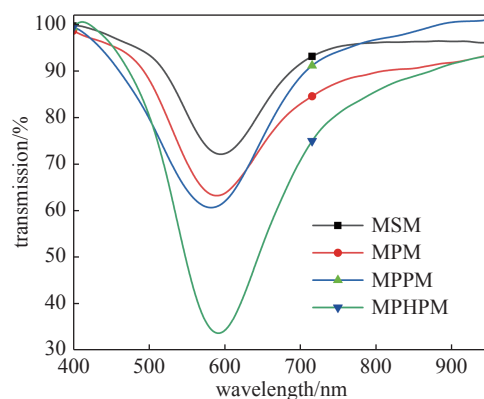


Fig. 6 Comparison of spectral resonance peak depths of four sensors with different sensing structures

图 6 4 种不同传感结构传感器的光谱共振峰深度对比

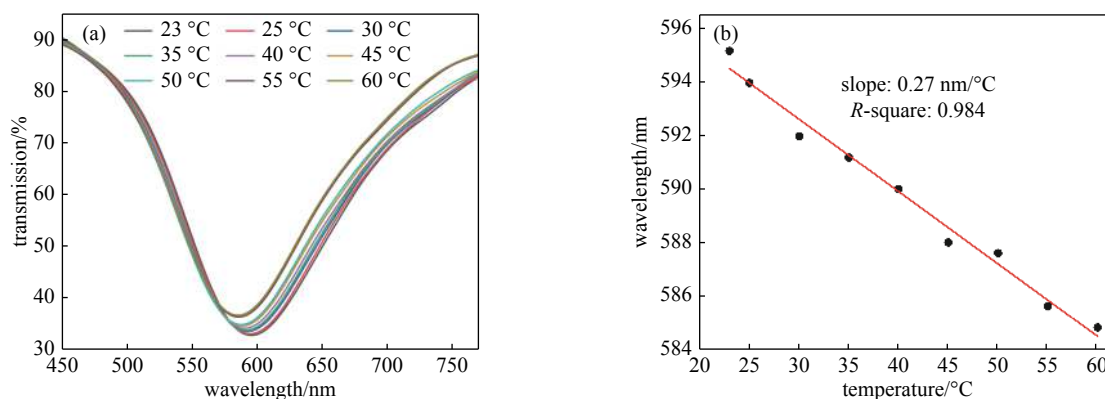


Fig. 7 Sensor response to temperature and linear fitting

图 7 传感器对温度的响应及线性拟合

中观察到,将温度从 23 °C 逐渐升高至 60 °C 时,共振波长蓝移。由图 7(b)中可知,传感器对温度的灵敏度约为 0.27 nm/°C。由于传感器对 RI 的灵敏度(2 142.52 nm)远远大于传感器对温度的灵敏度(0.27 nm/°C),因此在 RI 测量中,温度的影响可以忽略。

### 3 结论

本文基于表面等离子体共振原理,通过在光子晶体光纤之间的塌陷区域引入一个空气孔,制备了一款新型光纤传感器。实验表明,在 1.333~1.389 的 RI 范围内,该传感器对 RI 的灵敏度达到了 2 142.52 nm,且表现出良好的线性关系。与传统的单模光纤或光子晶体光纤制备的异芯结构传感器相比,本文所提出的传感器的 SPR 共振峰表现出更深的深度,改善了传感器的测量性能。此外,传感器对温度不敏感,在易受温度影响的环境中测量传感参量时,可以有效避免环境温度变化引起的实验误差。本文所提出的光纤传感器的制备方法简单,结构紧凑,高深度,高灵敏度,具有良好的线性关系,在生化医学、环境检测领域具备潜在的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Xian Pei, Feng Guoying, Ju Yao, et al. Single-mode all-fiber structured modal interference for temperature and refractive index sensing[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 085101.
- [2] Li Lecheng, Xia Li, Xie Zhenhai, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [3] Li Xiaowei, Tan Jianchang, Li Wei, et al. A high-sensitivity optical fiber temperature sensor with composite materials[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102821.
- [4] Tan Jianchang, Feng Guoying, Zhang Shulin, et al. Dual spherical single-mode-multimode-single-mode optical fiber temperature sensor based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(7): 075102.
- [5] 李筱薇, 谭建昌, 冯国英. 基于马赫-曾德干涉的全光纤双参量传感器[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(11): 111010. (Li Xiaowei, Tan Jianchang, Feng Guoying. All-fiber dual-parameter sensor based on Mach-Zehnder interference[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(11): 111010)
- [6] Liao C R, Hu Tianyi, Wang D N. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22813-22818.
- [7] Zhou Jiangtao, Wang Yiping, Liao Changrui, et al. Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber Michelson interferometer[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2015, 208: 315-319.
- [8] 范振凯, 张子超, 王保柱, 等. 基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 070004. (Fan Zhenkai, Zhang Zichao, Wang Baozhu, et al. Research progress of photonic crystal fiber refractive index sensors based on surface plasmon resonance effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 070004)
- [9] 魏方皓, 张祥军, 唐守锋. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤折射率传感器的设计与分析[J]. *半导体光电*, 2020, 41(1): 35-38,43. (Wei Fanghao, Zhang Xiangjun, Tang Shoufeng. Design and analysis of photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(1): 35-38,43)
- [10] Hassani A, Skorobogatiy M. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11616-11621.
- [11] Tan Y C, Tou Z Q, Chow K K, et al. Graphene-deposited photonic crystal fibers for continuous refractive index sensing applications[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31286-31294.
- [12] Taha B A, Ali N, Sapiee N M, et al. Comprehensive review tapered optical fiber configurations for sensing application: trend and challenges[J]. *Biosensors*, 2021, 11(8): 253.

- [13] Deng Ming, Tang Changping, Zhu Tao, et al. Refractive index measurement using photonic crystal fiber-based Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9): 1593-1598.
- [14] Zhao Yong, Xia Feng, Li Jin. Sensitivity-enhanced photonic crystal fiber refractive index sensor with two waist-broadened tapers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(4): 1373-1379.
- [15] Nguyen H H, Park J, Kang S, et al. Surface plasmon resonance: a versatile technique for biosensor applications[J]. *Sensors*, 2015, 15(5): 10481-10510.
- [16] Wang Qi, Wang Botao. Sensitivity enhanced SPR immunosensor based on graphene oxide and SPA co-modified photonic crystal fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 210-215.
- [17] Zheng Wanlu, Han Bo, E Siyu, et al. Highly-sensitive and reflective glucose sensor based on optical fiber surface plasmon resonance[J]. *Microchemical Journal*, 2020, 157: 105010.
- [18] Liu Shuhui, Cao Shaoqing, Zhang Zhe, et al. Temperature sensor based on side-polished fiber SPR device coated with polymer[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4063.
- [19] Shi Se, Wang Libing, Su Rongxiu, et al. A polydopamine-modified optical fiber SPR biosensor using electroless-plated gold films for immunoassays[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 74: 454-460.
- [20] Wang Qi, Wang Xuezhou, Song Hang, et al. A dual channel self-compensation optical fiber biosensor based on coupling of surface plasmon polariton[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 106002.
- [21] 郑万禄, 马遥, 张亚男. 光纤表面等离子体共振葡萄糖浓度传感器研究[J]. 自动化学报, 2020, 46(x): 1-5. (Zheng Wanlu, Ma Yao, Zhang Ya'nan. Research on glucose concentration sensor based on optical fiber surface plasmon resonance technology[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(x): 1-5)
- [22] Wang Yong, Huang Qing, Zhu Wenjie, et al. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1910-1917.
- [23] Chen Zhenlin, Han Kunlin, Zhang Ya'nan. Reflective fiber surface plasmon resonance sensor for high-sensitive mercury ion detection[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1480.
- [24] Liu Ye, Wang D N, Chen W P. Crescent shaped Fabry-Perot fiber cavity for ultra-sensitive strain measurement[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 38390.
- [25] Fan Jiakuan, Li Wenyu, Liu Yuhao, et al. Fiber strain sensor based on compact in-line air cavity fabricated by conventional single mode fiber[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, doi: 10.1002/mop.33157.
- [26] Wu Yongfeng, Zhang Yundong, Wu Jing, et al. Temperature-insensitive fiber optic Fabry-Perot interferometer based on special air cavity for transverse load and strain measurements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9443-9448.
- [27] Zhao Yong, Lei Ming, Liu Shixuan, et al. Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 261: 226-232.
- [28] Chauhan M, Kumar Singh V. Review on recent experimental SPR/LSPR based fiber optic analyte sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102580.
- [29] Zhang Rui, Pu Shengli, Li Xinjie. Gold-film-thickness dependent SPR refractive index and temperature sensing with hetero-core optical fiber structure[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4345.
- [30] Suzuki H, Sugimoto M, Matsui Y, et al. Effects of gold film thickness on spectrum profile and sensitivity of a multimode-optical-fiber SPR sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 132(1): 26-33.