

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413535

# FBG-FP 级联式无交叉敏感双参量光纤探针\*

王清明<sup>1,2</sup>, 张雯<sup>1,2</sup>, 文科<sup>3</sup>, 韩静<sup>4</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100016; 3. 中国空间技术研究院北京卫星制造厂有限公司 北京 100094; 4. 首都医科大学附属北京天坛医院 北京 100070)

**摘要:**为提高传感器集成度并适应设备微型化趋势,提出并制备了一种面向生物体液监测领域的光纤布拉格光栅-法布里珀罗(FBG-FP)级联结构紧凑型光纤探针,用于检测折射率和温度。通过构建级联结构反射率分布模型,优化了器件级联顺序。采用精密切割熔接技术制备单模光纤-空芯光纤-单模光纤(SMF-HCF-SMF)结构的FP探针,并利用飞秒激光直写技术在距熔接界面100 μm处刻写FBG,实现了级联式紧凑型双传感元件的集成,基于FBG结构与FP结构对温度和折射率的波长/强度响应特性,从原理上有效解决了交叉敏感问题。搭建温度折射率实验系统,在25℃~55℃水浴温度、1.333 0~1.381 6折射率范围内,对4根光纤探针的传感特性进行分析。实验结果表明,温度循环过程中,FBG与FP中心波长均随升温红移、降温蓝移,平均温度灵敏度分别为9.36、8.52 pm/℃;待测环境折射率增大时,FBG波长与强度无变化,FP干涉波长不变、谐振强度逐渐减小,且强度拟合结果呈抛物线趋势。以折射率1.354 6为界进行分段线性拟合,可得1.333 0~1.354 6折射率区间内FP灵敏度均值为5.86 dBm/RIU、最大值为10.72 dBm/RIU,在1.354 6~1.361 8折射率区间内FP灵敏度均值为1.40 dBm/RIU、最大值为2.74 dBm/RIU。该传感器制作简单、结构紧凑、灵敏度高,在生物体液监测领域具有良好的应用前景。

**关键词:** 光纤探针; 无交叉敏感; 双参数测量; 生物体液监测

中图分类号: TN253 TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## FBG-FP cascaded dual-parameter fiber optic probe without cross-sensitivity

Wang Qingming<sup>1,2</sup>, Zhang Wen<sup>1,2</sup>, Wen Ke<sup>3</sup>, Han Jing<sup>4</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 4. Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China)

**Abstract:** To enhance sensor integration and align with the trend of device miniaturization, a compact fiber optic probe based on a fiber Bragg grating-Fabry-Perot (FBG-FP) cascaded structure is proposed and fabricated for monitoring refractive index and temperature in biological fluids. By constructing a cascaded structure reflectivity distribution model, the device cascade sequence is optimized. The fiber FP probe with a single-mode fiber-hollow-core fiber-single-mode fiber structure is prepared using precise cutting and splicing techniques. A FBG is inscribed 100 μm from the splicing interface using femtosecond laser direct writing, achieving a cascaded compact dual-sensing element fiber optic probe. The wavelength/intensity response characteristics of the FBG and FP structures to temperature and refractive index effectively resolved the cross-sensitivity issue in principle. A temperature and refractive index experimental system is set up to analyze the sensing characteristics of four fiber optic probes within a temperature range of 25℃ to 55℃ and a refractive index range of 1.333 0 to 1.381 6. Experimental results show that, during temperature cycling, the FBG and FP central wavelengths redshifted with increasing temperature and blueshifted with decreasing temperature, with average temperature

收稿日期: 2024-11-24 Received Date: 2024-11-24

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52275517)、北京市自然科学基金(3232018)、市属高校教师队伍建设支持计划优秀青年人才(CPHR202203226)、高等学校学科创新引智计划(D17021)项目资助

sensitivities of 9.36 and 8.52 pm/°C, respectively. As the ambient refractive index increased, the FBG wavelength and intensity are unchanged, while the FP interference wavelength stays constant and the resonance intensity gradually decreases, with the intensity fitting results showing a parabolic trend. Segmented linear fitting with a refractive index of 1.3546 as the boundary reveals that within the refractive index range of 1.3330 to 1.3546, the FP sensitivity averaged 5.86 dBm/RIU with a maximum of 10.72 dBm/RIU, and within the range of 1.3546 to 1.3618, the FP sensitivity averaged 1.40 dBm/RIU with a maximum of 2.74 dBm/RIU. This sensor, characterized by its simple fabrication, compact structure, and high sensitivity, shows promising application prospects in the field of biological fluid monitoring.

**Keywords:** optical fiber probe; cross-sensitivity-free; dual-parameter measurement; biological fluid monitoring

## 0 引言

光纤传感技术以其高灵敏度、快速响应、抗电磁干扰能力强以及可远程操作等独特的优势,在生物体液监测领域展现出了广泛的应用前景<sup>[1]</sup>,并且在健康评估过程中发挥重要作用<sup>[2]</sup>。温度和折射率作为生物体液两个关键的生理参数,能直接反应生物生理状态。生物在环境应激时,体液温度在 25°C~55°C 波动<sup>[3]</sup>,同时会调节体内的渗透压,使体液折射率在 1.3330~1.3618 范围内改变,这些参数变化精准体现了生物的生理响应。温度变化能反映生物代谢和环境适应情况,折射率差异与体液成分、浓度及病理状态密切相关。因此,精确测量这两个参数对疾病早期诊断、治疗效果监测和生理功能评估意义重大<sup>[4-6]</sup>。相较于红外测量技术在生物测量领域的应用,光纤传感技术在生物体液监测方面表现出更高的精确度和可靠性,从而在该领域内展现出广阔的发展前景和应用潜力。

探针式光纤传感器采用高集成度的紧凑型设计,优化了在狭小、微限空间的参数检测能力<sup>[7-9]</sup>。其设计难点在于,传感元件数量的增加要求严格控制单个元件尺寸以确保测量精度,同时需合理设置元件间距以避免物理或电磁串扰。光纤布拉格光栅<sup>[10-11]</sup>(fiber Bragg grating, FBG)和光纤法布里-珀罗<sup>[12-13]</sup>(Fabry-Perot, FP)作为光纤传感器中常见的传感机制,具有体积小、灵敏度高、重复性好等优点。广泛应用于温度、湿度、折射率、应变、曲率等参数的测量<sup>[14-15]</sup>。但 FBG 对许多外部参数不直接敏感。为扩展光纤传感的时频复用功能,常将 FBG 和 FP 级联以实现多参数测量。2021 年 Zhang 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于三光束 FP 的光纤探头,用于温度和折射率测量;2022 年 Li 等<sup>[17]</sup>提出一种基于微气泡 FP 腔和 FBG 级联结构的压力传感器,利用 FBG 进行温度补偿;2023 年姚国珍等<sup>[18]</sup>提出了一种由单模布拉格光栅和多模 FP 腔级联而成的温度和折射率双参量传感器;2024 年 Li 等<sup>[19]</sup>提出了一种超短光纤光栅和 FBG-FP 干涉式加速度计,实现一定温度范围内振动信号的测量。这些方法在原理上利用 FBG 与 FP 不同的传感机制,构建灵敏

度系数矩阵,实现多参数同时测量。在技术实现上,FBG 与 FP 多采用熔接方式进行级联,级联间隔通常为毫米级,且存在交叉敏感问题,难以实现在狭小及微限空间中的多参数精准测量。

提出一种具有 FBG-FP 级联结构的紧凑型光纤探针,级联间距微米级,旨在实现微限空间高精度测量。基于无涂层 FBG 对折射率不敏感的原理,结合 FP 腔与 FBG 对折射率与温度的不同响应特性,通过监测 FP 腔反射谱谐振强度变化以及 FBG 反射谱谐振波长的漂移,分别利用强度调制和波长调制测量折射率和温度,从原理上有效解决了传统传感器中普遍存在的交叉敏感问题。利用熔接工艺及精准切割技术制备基于空芯光纤的 FP 微腔,并使用飞秒激光系统在距 FP 微腔 100 μm 处直接刻写 FBG,确保器件的高集成度。此设计可有效提升传感器灵敏度和测量精度,增强其在复杂环境中的稳定性和可靠性。

## 1 传感器结构及原理

### 1.1 级联结构反射率分布模型

对于级联式光纤传感器而言,级联结构的先后顺序将影响其输出特性。假设级联结构的反射率分布模型如图 1 所示, $R_1$ 、 $R_2$  均为反射式元件,且不具备方向选择性。

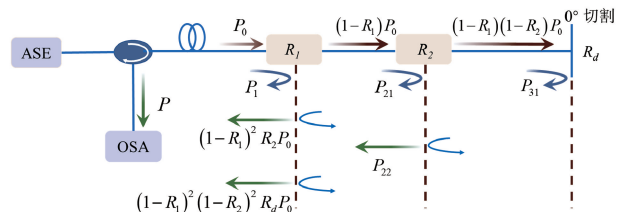


图 1 级联结构反射率分布模型

Fig. 1 Reflectivity distribution model of the cascaded structure

$P_0$  为放大自发辐射宽带光源 (amplified spontaneous emission broadband light source, ASE) 发出的光功率,经  $R_1$  反射后,光功率为  $P_1$ ,剩余光功率继续传播,在  $R_1$ 、 $R_2$  之间来回振荡并逐渐减小。第 1 次振荡后经  $R_2$  反射回来

的光功率为  $P_{21}$ , 部分光经过  $R_1$  透射后返回光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA), 光功率为  $(1 - R_1)^2 R_2 P_0$ 。经  $R_2$  反射后, 剩余光继续传输至光纤  $0^\circ$  端面, 在  $R_2$  与端面之间来回振荡并逐渐减小, 第 1 次振荡从  $R_d$  返回的光功率用  $P_{31}$  表示, 部分光经  $R_2$  透射后光功率为  $P_{22}$ ,  $P_{22}$  的光在  $R_1$  与  $R_2$  之间来回振荡, 经  $R_1$  透射返回 OSA 的光功率为  $(1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 R_d P_0^{[20]}$ 。

根据菲涅尔反射定律, 对于垂直切割的光纤端面, 光从光纤到空气的反射率  $R_d$  可以表示为:

$$R_d = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2} \quad (1)$$

其中,  $n_0$  表示光纤纤芯折射率,  $n_1$  表示外界环境折射率。忽略  $n$  次振荡后的光功率,  $P_0$  的光经过  $R_1$ 、 $R_2$  以及  $R_d$  之后返回光谱仪的光功率为  $P$ , 即:

$$P = R_1 P_0 + (1 - R_1)^2 R_2 P_0 + (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 R_d P_0 \quad (2)$$

$$R = R_1 + (1 - R_1)^2 R_2 + (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 R_d \quad (3)$$

当  $R_d$  值变化时, 外界折射率  $n_1$  随之变化, 随着  $n_1$  的增加,  $R_d$  的值先减小后增大。如图 2 所示, 在折射率范围 1.333 ~ 1.448 内,  $R_d$  减小, 且减小的速度逐渐减小; 在折射率范围 1.440 ~ 1.800 内,  $R_d$  逐渐增大。不同物质折射率下对应  $R_d$  值如表 1 所示。

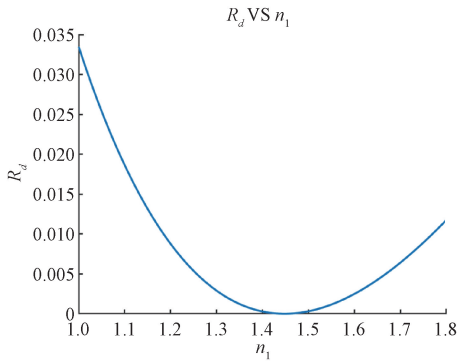


图 2  $R_d$  值随着  $n_1$  的变化  
Fig. 2  $R_d$  variation with  $n_1$

表 1 不同物质折射率下对应  $R_d$  值

Table 1  $R_d$  values for different refractive indices of substances

物质	RI	$R_d$
空气	1.000 0	$3.349 1 \times 10^{-2}$
水	1.333 0	$0.171 0 \times 10^{-2}$
甘油	1.473 0	$0.007 3 \times 10^{-2}$
二硫化碳	1.627 6	$0.341 0 \times 10^{-2}$

不同  $R_d$  取值下的三维曲面图如图 3 所示, 在三维空间中,  $R_1$  和  $R_2$  分别是  $x$  和  $y$  轴,  $R$  是  $z$  轴。每个曲面都显示了  $R$  如何随着  $R_1$  和  $R_2$  的变化而变化。由于  $R_d$  是固定的, 每个曲面都代表了在特定  $R_d$  条件下  $R_1$  和  $R_2$  与  $R$  之间的关系。

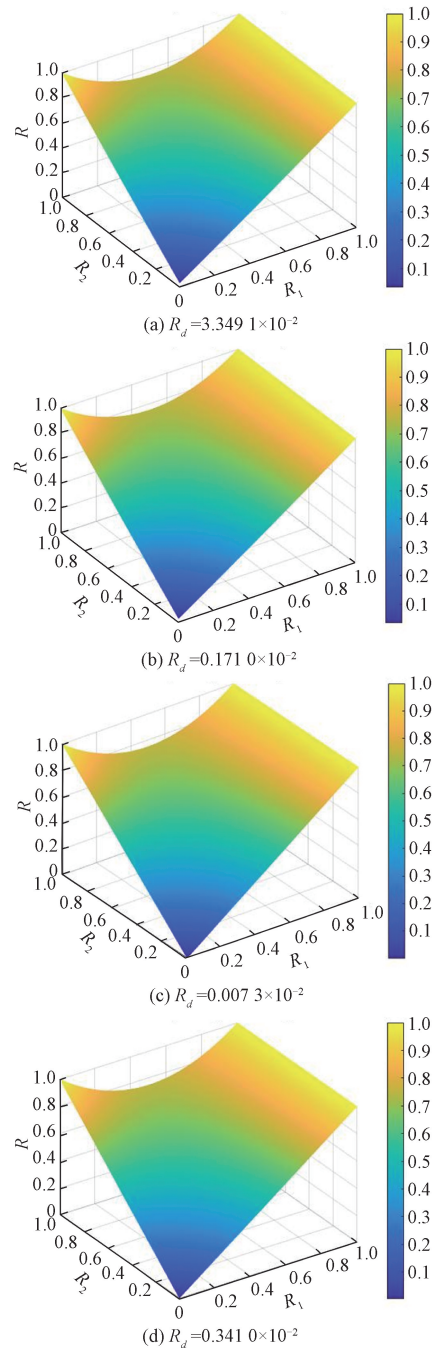


图 3 不同  $R_d$  取值下的三维曲面图

Fig. 3 3D surface plots with different  $R_d$  values

由图 3 可知, 三维曲面在  $R_1$  方向上变化明显,  $R$  值达到最大值的点主要分布在  $R_1$  值较大的区域, 且倾斜程度

较大,这表明  $R_1$  对  $R$  的影响较大;三维曲面在  $R_2$  方向上的变化相对较小,说明  $R_2$  对  $R$  的影响较小;即  $R_1$  的变化对  $R$  的影响更为显著。

## 1.2 传感器工作原理

光纤探针由 FBG 和空芯光纤 FP 腔级联而成,FP 腔位于传感器末端,由单模光纤-空芯光纤-单模光纤 (single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber, SMF-HCF-SMF) 构成,在空芯光纤的另一端熔接单模光纤,并利用飞秒激光技术在该单模光纤中刻写 FBG,传感器结构如图 4 所示。

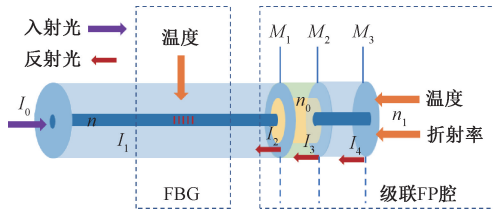


图4 传感器结构

Fig. 4 Schematic of the sensor structure

由于光纤纤芯、空气和被测环境的折射率不同,形成了3个反射面,从而构成空芯光纤 FP 腔。光源发射的光被耦合到 SMF 中,分别从  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$  表面反射,然后被 OSA 收集。

当强度为  $I_0$  的入射光进入单模光纤后,满足布拉格条件的光被反射,形成强度为  $I_1$  的反射光,其余光进入单模光纤中。根据多光束干涉理论,传感器的反射谱可表示为:

$$I_R(\lambda) = I_0 \cdot R_{FBG}(\lambda - \lambda_B) \cdot I_{FP} \quad (4)$$

其中,  $R_{FBG}$  表示 FBG 的反射率,  $\lambda_B$  表示 FBG 的反射波长。

当外界环境温度发生变化时,基于光纤光栅的弹光效应,其光栅周期会发生变化,进而导致光纤光栅的布拉格波长产生位移,使得传感器反射光谱发生改变。通过测量反射谱波长的变化量,即可实现温度传感。需要注意的是,FBG 对温度和应变均敏感,实验中 FBG 仅用于温度传感,因此在器件实际应用中,需确保其不受应变的影响,此时,其反射波长可表示为:

$$\lambda_{FBG} = f_1(T) \quad (5)$$

通过分析光纤传感探针在折射率变化环境内的光强分布<sup>[16]</sup>可知:

$$\begin{cases} \frac{dr_1}{dn_1} = \frac{dr_2}{dn_1} = 0 \\ \frac{dr_3}{dn_1} = -\frac{4n(n-n_1)}{(n+n_1)^3} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  分别为镜面  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$  的反射系数,  $n_0$  表示空气折射率,  $n$  表示纤芯折射率。可以看出,折射率灵敏度是关于  $r_3$  及其导数的函数,当器件浸入液体中

时,由于外界环境折射率  $n_1$  的变化,  $r_3$  发生变化,并且仅调制器件的反射强度,没有任何相位变化。这表明该结构可以通过测量其反射强度来进行周围折射率传感。

通过上述分析可知,在温度测量过程中,FBG 反射谱的波长发生改变;而在折射率测量过程中,第3反射面的反射率起主导作用,即当探针周围折射率改变时,光谱光功率强度会产生变化。因此,利用 FP 腔与 FBG 的级联结构,可以消除温度变化导致的级联 FP 腔波长改变对折射率测量的影响,进而实现温度和折射率的同时测量。

## 2 器件制备

器件制备过程中使用了自行搭建的光纤显微处理平台、光纤切割刀、光纤熔接机 (Fujikura 80 S)、飞秒激光刻写平台 (Coherent Astrella)、ASE 宽带光源和光谱仪 (Yokogawa6375) 等,如图 5 所示。

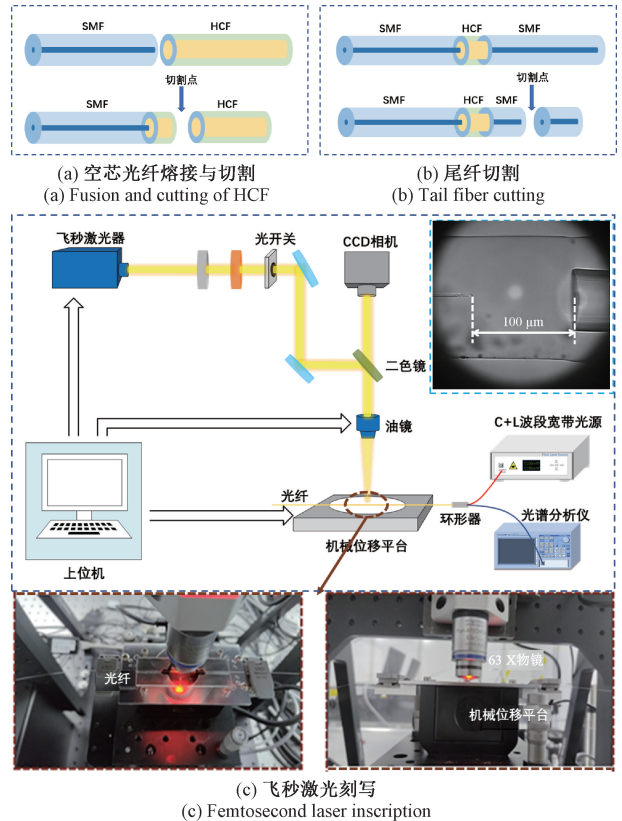


图5 器件制备流程

Fig. 5 Device fabrication process

使用剥线钳去除单模光纤 (Corning SMF-28) 与毛细管光纤 (iFiber TSP075150) 的聚酰亚胺涂覆层,用切割刀形成平坦规则的切割面,并借助光纤显微处理平台检查表面是否有裂纹或破碎。光纤耦合过程易受电弧作用产生过度熔化或破碎,操作难度大,部分优化参数如表 2 所示。

表 2 熔接参数设置

Table 2 Fusion parameter settings

预熔功率	预熔时间	清洁放电	端面间隔	重叠长度	放电功率	放电时间
标准 -100 bit	300 ms	20 ms	15 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	+80 bit	500 ms

使用光纤显微处理平台对空芯光纤进行精密定位切割,操作示意如图 5(a)所示。切割完成后,将空芯光纤的另一个端面与预先切平的单模光纤熔接,随后用切割刀对 FP 传感器末端光纤进行精密切割,如图 5(b)所示,以确保其长度达到预定要求,使反射主要集中在光纤末端。这一过程是构建单模-空芯-单模结构光纤 FP 探针的关键步骤。

将制备好的 FP 结构放置于飞秒激光刻写平台上,通过刻写物镜 (ZEISS Plan-APOCHROMAT, 63  $\times$ , NA = 1.4),将波长 800 nm、重频 1 kHz、脉宽 35 fs 的飞秒激光光斑定位在距离单模-空芯光纤熔接界面左侧 100  $\mu\text{m}$  的单模光纤处,光斑进行方向由右至左,制备周期 1 072 nm、长度 3 000  $\mu\text{m}$  的二阶布拉格光栅。

分别记录制备过程中 FP 形成、FBG 刻写、尾纤切割 3 个过程的光谱,如图 6 所示。其中,FP 形成时光谱具有明显的干涉现象,干涉峰分布均匀,对比度约为 5 dB,自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 约为 4.95 nm。利用飞秒激光刻写 FBG 完成后,器件反射光谱在 1 551.45 nm 处出现布拉格响应,且受串扰影响,相邻 FP 波峰出现抖动。切割尾纤形成光纤探针结构后,光谱形貌与切割前基本保持一致,强度略有上升,且 FP 干涉光谱出现细分现象。观察器件显微结构可知 (如图 7 所示),第 1 反射面与第 2 反射面间距约 247  $\mu\text{m}$ ,光纤端面构成第 3 反射面,且距离第 2 反射面约 988  $\mu\text{m}$ ,引入了端面反射能量,光谱出现了多光束干涉特性<sup>[16]</sup>。

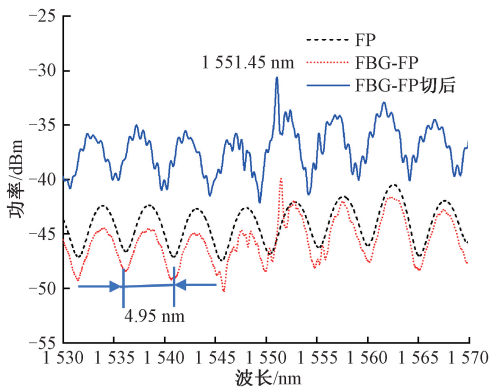


图 6 器件反射光谱

Fig. 6 Reflection spectra of the device

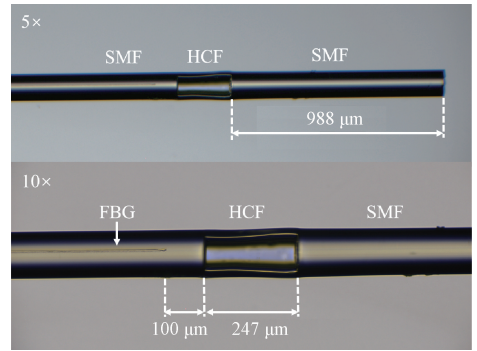


图 7 光纤探针显微图

Fig. 7 Micrograph of fiber optic probe

为验证 1.1 节提出的级联结构反射率分布模型,将制备的 FBG-FP 光纤微结构分别采取 FBG 在前、FP 在后,FP 在前、FBG 在后的两种级联模式,器件连接结构图及其反射光谱如图 8 所示。

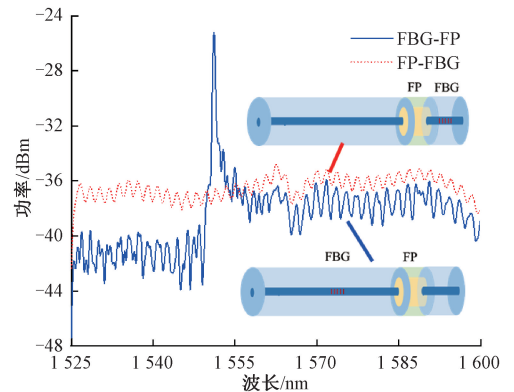


图 8 级联结构反射光谱

Fig. 8 Reflectance spectra of the cascade structures

由图可知,FBG 在前时,整体反射光谱形貌兼具 FBG 布拉格谐振特性和 FP 干涉特性;FP 在前时,反射光谱中 FBG 特性不明显。实验结果与 1.1 节仿真结果相符,证明该级联结构反射率分布模型的正确性,后文实验均以 FBG 在前、FP 在后的级联结构开展。

### 3 实验探究

#### 3.1 温度特性测试

温度传感实验装置如图 9 所示,主要包括宽带光源、水浴加热装置和光谱仪等设备。宽带光源的光经环形器传输至传感器,其反射光由环形器另一端口送入光谱仪显示。为模拟不同程度环境应激对生物体液温度的影响,实验设置温度范围 25 $^{\circ}\text{C}$ ~55 $^{\circ}\text{C}$ ,进行升、降温测试。数据采集时,光谱仪记录 1 510~1 600 nm 波段光谱数据,采样点设置 9 001,分辨率为 0.05 nm。

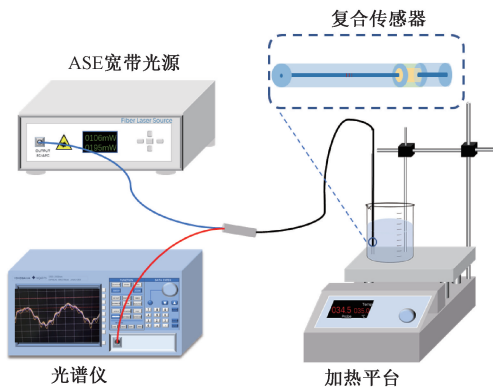


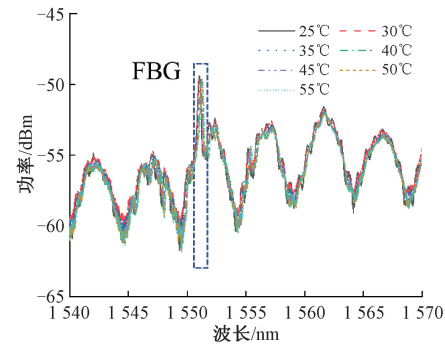
图9 温度实验装置

Fig. 9 Schematic of the temperature experiment setup

为确保温度环境稳定,将光纤探针置于精度为0.1℃的水浴加热装置。把光纤传感探针固定在加热装

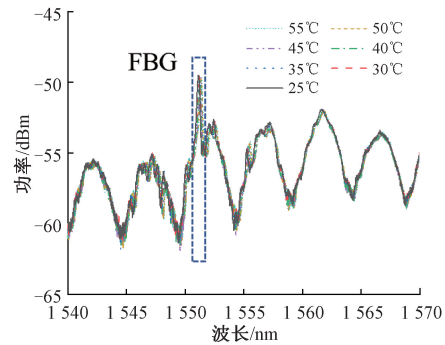
置的支架上,确保探针保持竖直且与杯底保持一定的距离。在实验过程中,水浴温度从25℃加热至55℃,再由55℃冷却至25℃,以5℃为步长进行温度传感特性测试。待水浴温度显示稳定后,等待10 min,确保数据记录时的温度已稳定不变。

传感器温度传感特性光谱如图10所示,选取FBG中心波长和FP在1568.5 nm波段的特征波谷作为观测点,研究温度对光纤探针反射光谱的影响。升温时,FBG和FP反射光谱均出现红移,波长变化与温度呈显著线性关系,由线性拟合结果可得,探针A的FBG温度灵敏度为8.94 pm/℃,线性度0.993;FP温度灵敏度为7.78 pm/℃,线性度0.991。降温时,传感器反射光谱沿短波长方向漂移,FBG温度灵敏度8.81 pm/℃,FP温度灵敏度6.94 pm/℃,线性度分别为0.999和0.997。



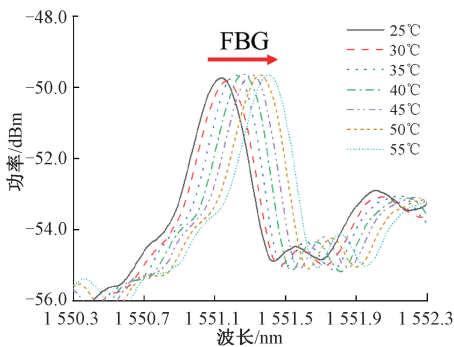
(a) 升温过程器件反射光谱

(a) Sensor reflectance spectra during heating process



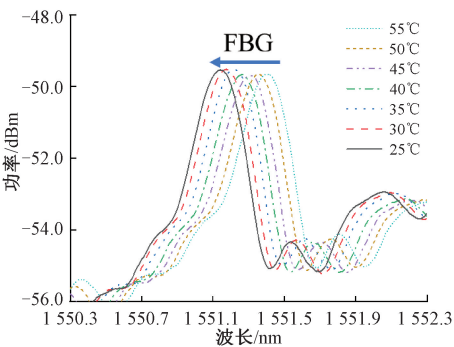
(b) 降温过程器件反射光谱

(b) Sensor reflectance spectra during cooling process



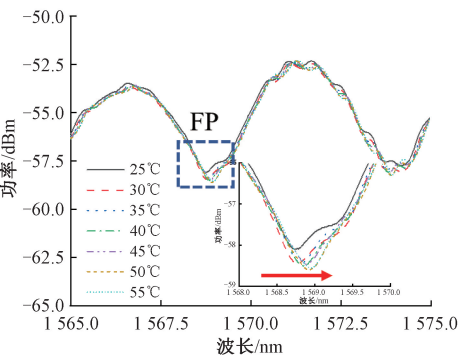
(c) 升温过程FBG反射光谱

(c) FBG reflectance spectra during heating process



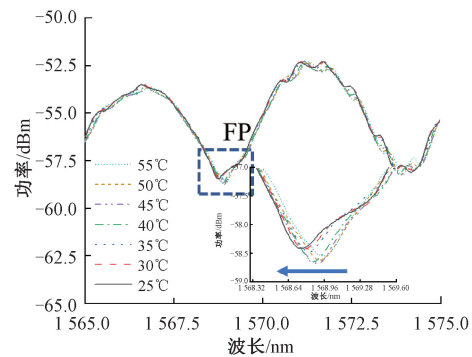
(d) 降温过程FBG反射光谱

(d) FBG reflectance spectra during cooling process



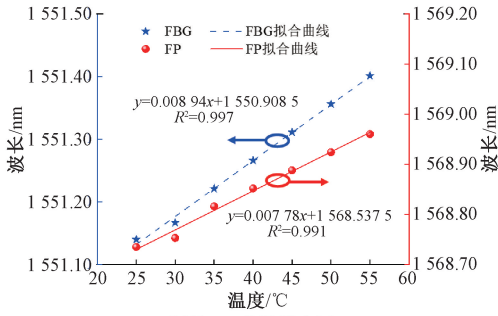
(e) 升温过程FP反射光谱

(e) FP reflectance spectra during heating process

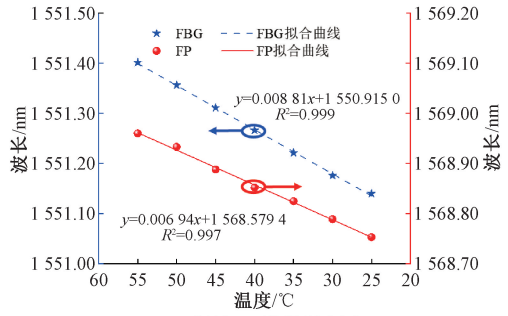


(f) 降温过程FP反射光谱

(f) FP reflectance spectra during cooling process



(g) 探针 A: 升温拟合图  
(g) Probe A: Linear fittings of the heating process



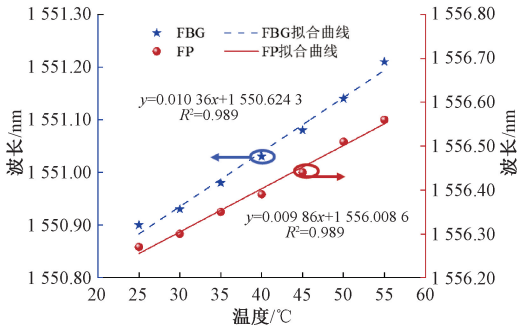
(h) 探针 A: 降温拟合图  
(h) Probe A: Linear fittings of the cooling process

图 10 探针 A 温度循环过程光谱漂移及线性拟合图

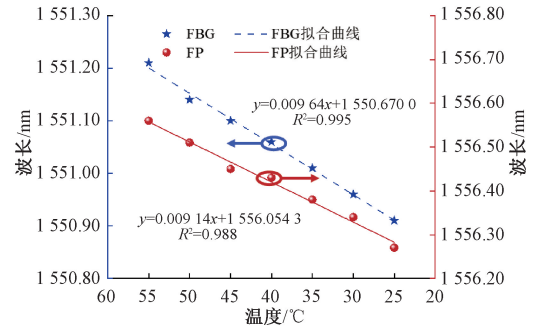
Fig. 10 Spectral drifts and linear fittings during the temperature cycling processes of probe A

采集另外 3 支探针在稳定水浴环境中光谱图, 数据处理后拟合图如图 11 所示。对温度循环中干涉光谱 FBG 中心波长及 FP 波谷漂移数据拟合, 得到 4 只光纤探

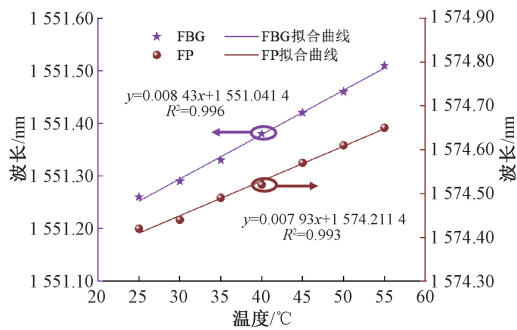
针升温时, FBG 温度灵敏度分别为 8.94、10.36、8.43 和 9.86 pm/°C, 降温灵敏度分别为 8.81、9.64、9.21 和 9.64 pm/°C, 如表 3 所示, 其中探针 B 灵敏度最高。受水



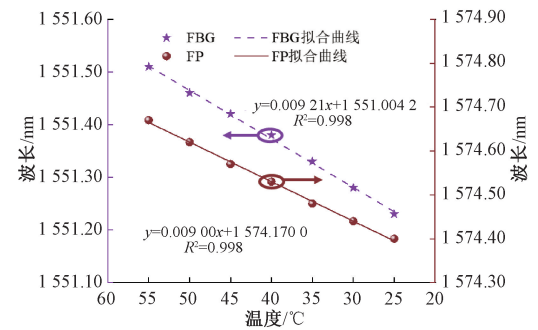
(a) 探针 B: 升温拟合图  
(a) Probe B: Linear fittings of the heating process



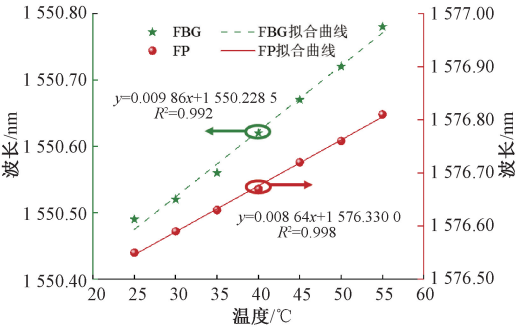
(b) 探针 B: 降温拟合图  
(b) Probe B: Linear fittings of the cooling process



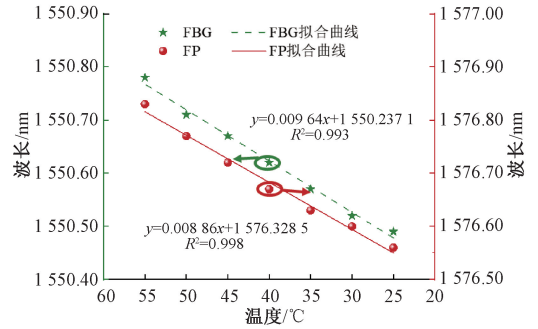
(c) 探针 C: 升温拟合图  
(c) Probe C: Linear fittings of the heating process



(d) 探针 C: 降温拟合图  
(d) Probe C: Linear fittings of the cooling process



(e) 探针 D: 升温拟合图  
(e) Probe D: Linear fittings of the heating process



(f) 探针 D: 降温拟合图  
(f) Probe D: Linear fittings of the cooling process

图 11 温度循环过程线性拟合图

Fig. 11 Linear fittings of the temperature cycling processes

表3 探针温度灵敏度及线性度

Table 3 Temperature sensitivities and fitting linearities of four optical fiber probes of heating and cooling processes

敏感结构	探针编号	升温		降温		4根探针平均 灵敏度/( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )
		灵敏度/( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )	线性度	灵敏度/( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )	线性度	
FBG	A	8.94	0.997	8.81	0.999	9.36
	B	10.36	0.989	9.64	0.995	
	C	8.43	0.996	9.21	0.998	
	D	9.86	0.992	9.64	0.993	
FP	A	7.78	0.991	6.94	0.997	8.52
	B	9.86	0.989	9.14	0.988	
	C	7.93	0.993	9.00	0.998	
	D	8.64	0.998	8.86	0.988	

浴环境、数据采集及外界因素影响,升降温时温度灵敏度和线性度均有变化。

温度实验数据表明,提出的级联式紧凑型 FBG-FP 传感结构中,FBG 温度灵敏度高于 FP。因此,后续选用 FBG 作为级联结构中温度敏感元件。

### 3.2 折射率特性测试

折射率传感实验装置与上述温度实验装置一致。为确保实验过程中折射率环境稳定,将实验器件固定在烧杯中。由于生物体液折射率在环境应激状态会在 1.333 0~1.361 8 范围内波动<sup>[3]</sup>,所以将折射率实验范围设定为 1.333 0~1.361 8。实验前,预先配制浓度为 23% 的 NaCl 溶液。实验时,在初始装有 40 ml 水的烧杯中,每次注入 10 ml 的 23% NaCl 溶液,共 10 次注入,逐步提高溶液浓度。不同浓度 NaCl 溶液折射率如表 4 所示。

表4 不同浓度 NaCl 溶液折射率

Table 4 Refractive index of NaCl solutions

浓度/%	折射率	浓度/%	折射率
0	1.333 3	14.28	1.360 0
5.66	1.338 4	15.25	1.365 4
9.09	1.343 8	16.03	1.370 8
11.39	1.349 2	16.67	1.376 2
13.04	1.354 6	17.17	1.381 6

待光谱稳定后,记录折射率变化过程反射光谱漂移图,选取 FBG 中心波长和 FP 在 1 595.8 nm 波段的特征波谷为观测点,研究折射率对光纤探针反射光谱的影响,探针初始光谱图及光谱漂移图如图 12 所示。

由此可知,随着外界环境折射率增大,FP 反射光谱

对比度逐渐降低,光功率强度随之减弱。而 FBG 反射光谱在波长和强度上均未无变化,对折射率不敏感。因此,FBG-FP 级联结构中宜选用 FP 作为检测折射率变化的敏感元件,以此消除温度变化对级联 FP 腔波长的影响,实现温度和折射率同时测量。

采集 4 只探针在不同折射率溶液中的光谱数据,并将波谷数据进行拟合,得到如图 13 所示的拟合图。

可知,FBG 强度无明显变化,FP 强度拟合结果整体呈抛物线趋势,对折射率进行分段拟合,以 1.354 6 为分段点,在 1.333 0~1.354 6 折射率区间线性度良好且变化趋势显著。其中,探针 A 的 FP 折射率灵敏度最高,可达 10.722 dBm/RIU;在 1.354 6~1.361 8 区间,变化趋势渐缓,FP 折射率灵敏度最高为 2.735 dBm/RIU。这是因为在外界折射率不断上升过程中,尤其是当环境折射率接近光纤纤芯的折射率时,反射强度变化速率显著减缓,与仿真结果相符。4 只探针折射率灵敏度及线性度数据如表 5 所示。

表5 探针折射率传感灵敏度及线性度

Table 5 Probe refractive index sensitivities and fitting linearities

探针	1.333 0~1.354 6		1.354 6~1.361 8	
	灵敏度/ (dBm/RIU)	线性度	灵敏度/ (dBm/RIU)	线性度
A	10.722	0.998	2.735	0.915
B	5.833	0.976	0.873	0.955
C	2.264	0.992	0.850	0.996
D	4.629	0.967	1.130	0.952



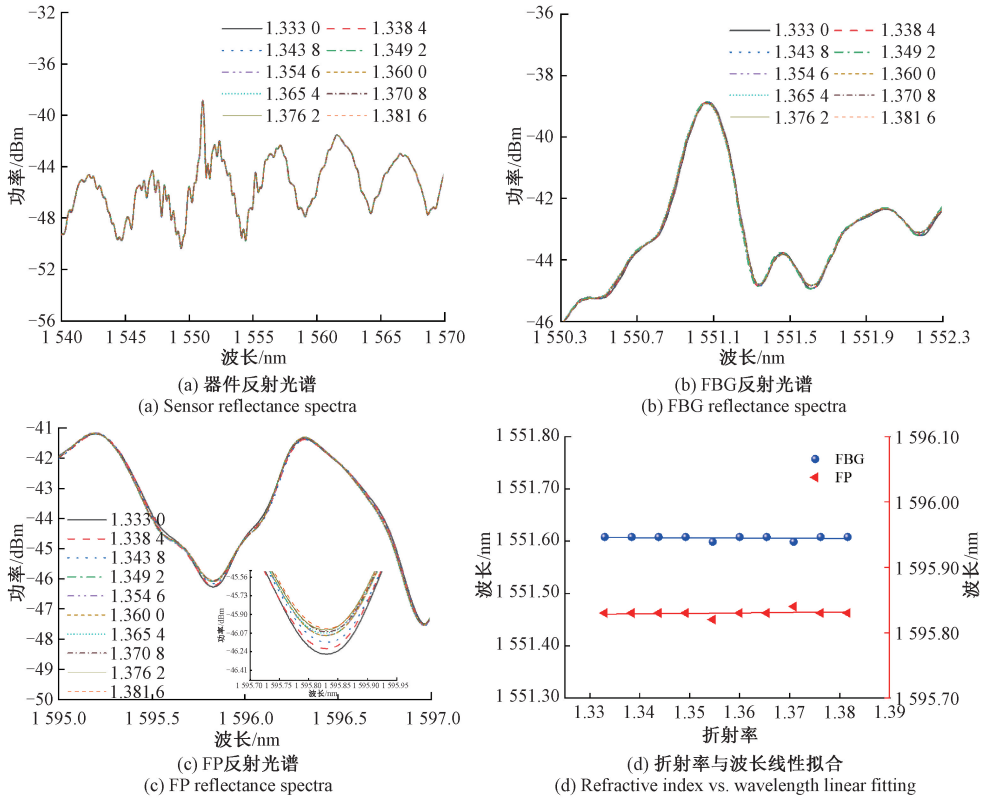


图 12 探针 A 折射率变化反射光谱漂移及拟合图

Fig. 12 Reflection spectral drifts and linear fittings with refractive index variation of probe A

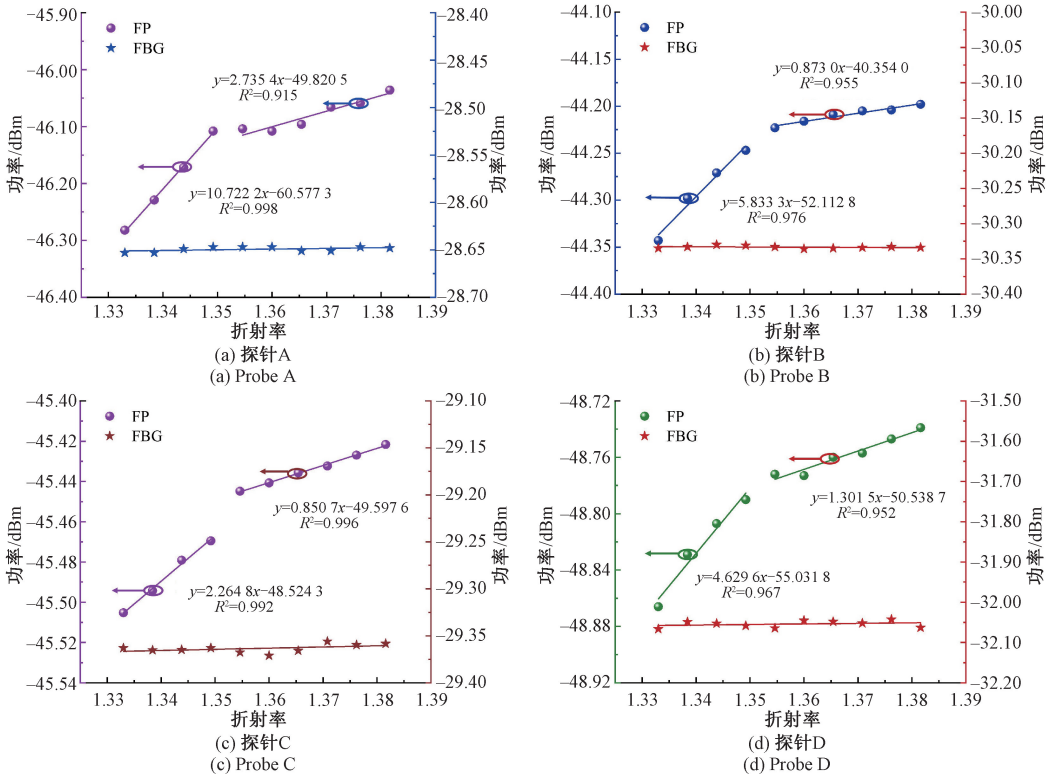


图 13 折射率变化探针反射强度线性拟合图

Figure. 13 Linear fittings of the probe's reflection intensity with refractive index variation

## 4 结 论

本研究提出了一种面向生物体液监测的级联式紧凑型 FBG-FP 光纤探针。建立级联结构反射率分布模型,通过理论推导与仿真分析优化了级联结构连接顺序。使用光纤精密切割熔接技术结合飞秒激光刻写工艺,制备了空芯光纤长度 247  $\mu\text{m}$ 、光纤光栅长度 3 000  $\mu\text{m}$ 、单模尾纤长度 988  $\mu\text{m}$  的 FBG-FP 级联结构,实现了双传感元件间距 100  $\mu\text{m}$  的紧凑型光纤探针。利用 FP 腔对温度和折射率敏感、FBG 对温度敏感而对折射率不敏感的传感特性,分别使用波长调制和强度调制对反射光谱信号进行处理,实现了无交叉敏感双参数测量。实验结果表明,温度范围 25 $^{\circ}\text{C}$ ~55 $^{\circ}\text{C}$  时,FBG/FP 中心波长与温度呈良好线性关系,灵敏度达 9.36 及 8.52  $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ;折射率范围 1.333 0~1.361 8 时,FBG 波长与强度均无变化,FP 折射率灵敏度分别为 10.722  $\text{dBm}/\text{RIU}$  (1.333 0~1.354 6)、2.735  $\text{dBm}/\text{RIU}$  (1.354 6~1.361 8)。该传感器制作简单、结构紧凑、成本低、灵敏度高且线性度高,为生物体液监测领域温度折射率测量提供了重要价值。

## 参考文献

- [1] ASSUNCAO A S, VIDAL M, MARTINS M J, et al. Detection of NT-proBNP using optical fiber back-reflection plasmonic biosensors [J]. *Biosensors*, 2024, 14(4):173.
- [2] 张亚男, 靳泼, 郑万禄, 等. 面向人体健康防护的光纤生化传感技术[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8):2313-2325.  
ZHANG Y N, JIN P, ZHENG W L, et al. Research on optical fiber biochemical sensing technology for human health protection [J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8):2313-2325.
- [3] KETOLA T, LAAKSO J, KAITALA V, et al. Evolution of Hsp90 expression in *Tetrahymena thermophila* (Protozoa, Ciliata) populations exposed to thermally variable environments [J]. *Evolution*, 2004, 58(4):741-748.
- [4] LIU W, YIN ZH Y, SONG D CH, et al. A ratiometric fluorescent fiber sensor based on integrated silica and tellurite glass for real-time human thermal monitoring[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(15):26049-26056.
- [5] SONG L P, CHEN J, XU B B, et al. Flexible plasmonic biosensors for healthcare monitoring: Progress and prospects[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(12):18822-18847.
- [6] YADAV S M. Au-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Coated highly sensitive broad-range refractive index sensor for detecting malaria disease in human blood [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(15):23754-23763.
- [7] DU B B, LU J X, LI X K, et al. A compact and selective plasmonic fiber probe for temperature detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73:1-5.
- [8] 于昌新, 何彦霖, 祝连庆, 等. 光纤传感微创手术探针末端三维力测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(1):38-45.  
YU CH X, HE Y L, ZHU L Q, et al. Three-dimensional end-force measurement method of optic fiber sensing minimally invasive surgical probe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(1):38-45.
- [9] 张雯, 熊洁, 李昊业, 等. 多光束干涉光纤 FP 探针脉动微压传感研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7):82-93.  
ZHANG W, XIONG J, LI H Y, et al. Research on the multi-beam interference optical fiber Fabry-Perot probe for pulsating micro-pressure sensing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7):82-93.
- [10] GUO K K, HE J, LI H, et al. High-spatial-resolution high-temperature sensor based on ultra-short fiber bragg gratings with dual-wavelength differential detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(7):2166-2172.
- [11] CHEN Y H, LI CH, YANG X ZH. Simultaneous measurement of trace dimethyl methyl phosphate and temperature using all fiber Michaelson interferometer cascaded FBG [J]. *Optics Express*, 2023, 31(4):6203-6216.
- [12] ZHANG W, LIU Y G, ZHANG T, et al. Integrated Fiber-Optic Fabry-Pérot interferometer sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(13):5007-5013.
- [13] ZHAO J, ZHAO Y, PENG Y, et al. Simultaneous measurement of salinity and temperature based on Fabry-Perot interference and anti-resonance effect[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 369:132248.
- [14] 王冰, 王伟, 冯嘉双, 等. 空芯光纤多模干涉型温度传感器[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(1):169-172.  
WANG B, WANG W, FENG J SH, et al. Multi-mode interferometric temperature sensor based on hollow core fiber [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(1):169-172.

- [15] 杨玉强, 张钰颖, 高佳乐, 等. 一阶光学游标效应的全光纤温度传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4):234-240.  
YANG Y Q, ZHANG Y Y, GAO J L, et al. All-fiber temperature sensor based on first-order optical Vernier effect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4):234-240.
- [16] ZHANG W, LI H Y, ZHU L Q, et al. Dual-parameter optical fiber probe based on a three-beam Fabry-Perot interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4):4635-4643.
- [17] LI T L, ZHENG Y H, GUO W ZH, et al. Micro-Bubble F-P cavity and FBG cascade structure-based pressure sensor with temperature self-compensation for minimally invasive surgery [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2022, 69(11):3288-3299.
- [18] 姚国珍, 宗子天, 吴玉章, 等. 基于FBG和F-P的温度和折射率双参量传感器[J]. 半导体光电, 2024, 45(3):349-355.  
YAO G ZH, ZONG Z T, WU Y ZH, et al. Temperature and refractive index sensor based on multimode fiber cascaded Fabry-Perot cavities[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(3):349-355.
- [19] LI X Y, LIU X, LI SH SH, et al. An FBG-FPI accelerometer based on femtosecond laser-written ultrashort fiber Bragg gratings[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73:1-8.
- [20] 葛诗雨, 沈华, 朱日宏, 等. 高精度测量高功率光纤激光器低反光栅反射率的方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11):229-235.  
GE SH Y, SHEN H, ZHU R H, et al. Method for high-precision measurement of high power fiber laser output coupler's reflectivity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11):229-235.

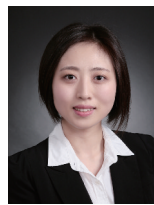
## 作者简介



王清明, 2021年于西南民族大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电器件。

E-mail: qmwang0309@163.com

**Wang Qingming** received her B. Sc. degree from Southwest Minzu University in 2021. She is currently a master student at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.



张雯 (通信作者), 2016年于天津大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感与光纤微结构。

E-mail: wenzhang@bistu.edu.cn

**Zhang Wen** (Corresponding author)

received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2016. She is currently an professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing and microstructure.



文科, 2017年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国空间技术研究院研究员, 研究方向为智能传感与智能制造技术。

E-mail: rongyu\_wen@163.com

**Wen Ke** received his Ph. D. degree from

Beihang University in 2017. He is currently a researcher at the China Academy of Space Technology. His main research include focuses on intelligent sensing and intelligent manufacturing technology.



韩静, 2019年于首都医科大学获得博士学位, 现为首都医科大学附属北京天坛医院副主任医师, 研究方向为心脑血管疾病与医工结合临床研究。

E-mail: hj62981@163.com

**Han Jing** received her Ph. D. degree from

Capital Medical University in 2019. She is currently an associate chief physician at Beijing Tiantan Hospital, affiliated with Capital Medical University. Her research focuses on cardiovascular and cerebrovascular diseases and clinical research in the integration of medicine and engineering.



祝连庆, 分别在1984年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail: zhulianqingbistu@163.com

**Zhu Lianqing** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1984 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing, fiber laser, and opto-electrical precision measurement technology.