DOI:10.16136/j.joel.2023.08.0321

一种基于马赫-曾德尔干涉仪的折射率和温度 同时测量传感器

刘 婷^{1,2,3},张 静^{1,2,3},李永倩^{1,2,3*},武佳琪^{1,2,3},张雨微^{1,2,3},赵 旭^{1,2,3}

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室,河北 保定 071003; 3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室,河北 保定 071003)

摘要:设计制作了一种基于马赫-曾德干涉结构的传感器用于折射率和温度的同时测量,传感器的 结构为单模-多模-细芯-多模-单模。利用 RSoft 光学仿真软件的 BeamPROP 模块对传感结构内部 光场进行模拟分析,确定了多模光纤(multi-mode fiber, MMF)及细芯光纤(thin core fiber, TCF)的 最优长度,制作了传感结构并搭建实验系统观测其折射率和温度响应情况,结合敏感矩阵,实现 了双参量的同时测量。实验结果表明,该传感器在1.333—1.380的折射率范围内灵敏度为 -44.944 nm/RIU,在 30—65 ℃的温度范围内灵敏度为 0.082 9 nm/℃。本文提出的传感器结构简 单、体积小、灵敏度高,可以为折射率和温度双参量传感设计提供参考。 关键词:光纤传感器;马赫-曾德尔干涉仪(MZI);折射率;温度 中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)08-0785-07

A sensor for measuring refractive index and temperature simultaneously based on Mach-Zehnder interferometer

LIU Ting^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2,3}, LI Yongqian^{1,2,3*}, WU Jiaqi^{1,2,3}, ZHANG Yuwei^{1,2,3}, ZHAO Xu^{1,2,3}

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: A sensor based on Mach-Zehnder interference structure is designed to measure refractive index and temperature simultaneously. The sensor structure is single mode-multi-mode-thin core-multi-modesingle mode. BeamPROP module of RSoft optical simulation software was used to simulate and analyze the optical field inside the sensor structure. The optimal length of the multi-mode fiber (MMF) and the thin core fiber (TCF) was determined. The sensor structure was made and the experimental system was set up to observe the refractive index and temperature response. Dual-parameter measuring simultaneously was realized combined with sensitivity matrix. The experimental results show that the sensitivity of the sensor is -44.944 nm/RIU in the refractive index range of 1.333-1.380 and 0.0829 nm/°C in the temperature range of 30-65 °C. The proposed sensor has the advantages of simple structure, small volume and high sensitivity, which can provide reference for the design of dual-parameter sensor of refractive index and temperature.

Key words: optical fiber sensor; Mach-Zehnder interferometer (MZI); refractive index; temperature

* E-mail:liutinngy@163.com

收稿日期:2022-05-03 修订日期:2022-07-09

基金项目:国家自然科学基金(61775057,62171185,52177141)、河北省自然科学基金(F2019502112)和中央高校基本科研业务费专项基金(2019MS086,2021MS071)资助项目

0 引 言

折射率的测量在食品安全、海洋监测、化学工 业等领域起着重要的作用。在实际应用中,因为 光纤传感器灵敏度高,其光学特性往往受到多个 物理参量共同影响,这就是光纤传感器的交叉敏 感问题,在解调时也无法判断具体是哪个物理参 量发生了改变。利用光纤传感器进行折射率测量 时,受到热光效应和热膨胀效应的影响,温度的变 化给折射率的测量带来不容忽视的干扰,因此双 参量同时测量传感器越来越受到关注[1-3]。2017 年,YAO 等^[4]将两个光纤布拉格光栅级联,其中 一个利用氢氟酸腐蚀形成锥形,实现了折射率和 温度的同时测量,灵敏度分别为13.76 nm/RIU和 0.046 nm/℃。2018年,胡义慧等^[5]制作了一种在 单模光纤(single mode fiber, SMF)中熔接一段硬 塑料包层光纤的马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI),实现了折射率和温度 的同时测量,折射率与温度灵敏度分别达到了 - 152.56 nm/RIU 和 0.0133 nm/℃。2020年, WANG 等^[6] 通过在无芯光纤上制作一个 S 形锥 形区级联的结构,实现了折射率和温度的同时测 量,折射率和温度灵敏度分别为 460.66 nm/RIU 和一0.0429 nm/℃。2021 年,陶武强等^[7] 通过将 无芯光纤和长周期光纤光栅级联制成了一种新型 传感器,其中无芯光纤和长周期光纤光栅分别对 折射率和温度的变化敏感,从而实现折射率和温 度的同时测量,灵敏度分别为102.80 nm/RIU和 0.0198 nm/°C 。

上述文献中的传感器都对折射率和温度的同 时测量进行了深入研究,但利用氢氟酸腐蚀光纤 光栅危险系数较高,使用特种光纤价格昂贵,使用 锥形结构保存困难,光栅级联使系统复杂,成本较 高。本文设计制作了一种基于单模-多模-细芯-多 模-单模结构的 MZI,利用光束传播法模拟仿真确 定各光纤段的最佳长度,制作传感器并进行了折 射率与温度的测量。该传感器结构简单稳固、成 本低廉、灵敏度高,可以满足折射率和温度的同时 测量需求。

1 传感器原理与数值模拟

1.1 传感器工作原理

在 MZI 中,光束在经过第一个耦合器后分成两 束光,分别进入参考臂和传感臂中传输。当外界参 量变化时,传感臂受到干扰,光的相位发生变化,而 参考臂不受影响,因此在传感臂和参考臂中传输的 两路光产生相位差,最后于第二个耦合器中发生干

涉[8,9]。图1为传感器结构示意图,传感器由入射光 纤 SMF1、凸锥结构 Up-taper、直径为 105/125 μm 的 多模光纤(multi-mode fiber, MMF)MMF1、直径为 6/80 μm 的细芯光纤(thin core fiber, TCF)、直径为 50/125 µm 的 MMF2 和出射光纤 SMF2 构成。其中 凸锥结构是在入射光纤末端通过多次放电形成的, 测量得直径为176 um。凸锥结构为传感器的第一个 耦合器,激发出包层模;MMF1采用大芯径 MMF,增 大与凸锥末端纤芯直径的差值,使纤芯失配严重,可 以更有效地激发出更多的包层模,提高传感器的灵 敏度; TCF 作为传感光纤, 因其具有较小的纤芯直 径,对光的束缚能力弱,所以 TCF 对外界环境参量 的变化更加敏感;MMF2作为结构最后的耦合器,采 用较大芯径的 MMF 可以将更多的 TCF 中的包层模 耦合到纤芯中,且避免最后传输到 SMF2 时损失大 量的光能量。光束传播过程中,纤芯模为参考臂,包 层模为传感臂。实验中采用的光纤切割刀型号为 KL-21,光纤熔接机型号为 KL-260,实验中光纤熔接 均为对轴熔接。



图 1 飞感奋结构示息图 Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

入射光从宽谱光源输出后,经光纤 SMF1 到凸 锥处,由于光纤纤芯直径突然增大,光波的传输模式 发生了变化,包层模式被激发并进入到光纤包层中 传输,此时光在 MMF1 的纤芯和包层中传输。当光 到达 MMF1 和 TCF 分界面时,部分光耦合进入 TCF 的包层中,更多的包层模式被激发,部分光进入 到 TCF 纤芯中传输,剩余的光则泄漏到外界环境 中。最后,光在 MMF2 处耦合干涉,经出射光纤传输 至光谱分析仪。光在传输过程中,存在纤芯模和包 层模两种有效折射率不同的模式,两种模式之间存 在相位差,本文设计的传感器由两个 MZI 级联构成, 分别是凸锥-MMF1和 TCF-MMF2。

1.1.1 折射率传感原理

本文中传感器发生的干涉主要是纤芯模和被激 发的包层模之间形成的,在一定波长下,其干涉强度 可以表示为^[10]:

 $I = I_{co} + \sum_{m} I_{cl,m} + \sum_{m} 2 \sqrt{I_{co} I_{cl,m}} \cos \varphi , \quad (1)$ 式中, I 是干涉波的总强度, $I_{co} 与 I_{cl,m}$ 分别是纤芯模 与 m 阶包层模的光强度, φ 是纤芯模和包层模之间 的相位差, 相位差 φ 可以表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\rm eff}L}{\lambda} , \qquad (2)$$

式中, L 是传感区域长度, Δn_{eff} 是纤芯模与包层模的 有效折射率差, λ 是自由空间的波长。

当 $\varphi = (2m+1)\pi(m$ 为正整数)时,干涉光强达 到最小值,出现干涉波谷。根据式(2)可以得到波谷 的波长为:

$$\lambda_{\rm Dip} = \frac{2\Delta n_{\rm eff}L}{2m+1} \ . \tag{3}$$

当外界环境折射率增大时,包层模的有效折射 率变大,而纤芯模几乎不变,所以二者的有效折射率 差 Δ*n*_{eff} 减小,由式(3)可知,干涉波谷将向短波长方 向偏移。

当光纤外界环境的折射率发生变化时,特征波长的折射率灵敏度 S_{RI} 可以表示为:

$$S_{\rm RI} = \frac{\partial \lambda_{\rm Dip}}{\partial n_{\rm ext}} = \frac{\frac{-2L}{2m+1} \frac{\partial n_{\rm cl,m,eff}}{\partial n_{\rm ext}}}{1 - \frac{2L}{2m+1} (\frac{\partial \Delta n_{\rm eff}}{\partial \lambda})}, \qquad (4)$$

式中, n_{ext} 表示外界环境的折射率, n_{el,m,eff} 表示第 m 阶包层模的有效折射率。

1.1.2 温度传感原理

当外界环境温度变化时,受到热光效应和热膨胀效应的影响,传感长度 L 和有效折射率差 Δn_{eff} 也将变化。若外界环境变化量为 ΔT ,则光纤长度和模式折射率的变化可以表示为^[11]:

$$L(T) \approx L(T_0)(1 + \alpha_s \Delta T) , \qquad (5)$$

$$\Delta n_{\rm eff}(T) \approx \Delta n_{\rm eff}(T_0) + \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Delta T , \qquad (6)$$

式中, $\alpha_s = 5.5 \times 10^{-7} \mathbb{C}^{-1}$ 是光纤的热膨胀系数, $L(T_0)$ 和L(T)分别是外界环境温度为 T_0 和T时光 纤的长度, $\Delta n_{\text{eff}}(T_0)$ 和 $\Delta n_{\text{eff}}(T)$ 分别是外界温度为 T₀和 T 时纤芯模和包层模的有效折射率差。根据式 (5)和式(6)可知,当外界环境温度升高时,L 和 Δn_{eff} 都会增大,由式(3)可得,干涉波谷将向长波长方向 偏移,特征波长的温度灵敏度 S_T 可以表示为:

$$S_{T} = \frac{\partial \lambda_{\text{Dip}}}{\partial T} = \frac{2L}{2m+1} (\Delta n_{\text{eff}} \alpha_{\text{s}} + \zeta_{\text{co,eff}} n_{\text{co,eff}} - \zeta_{\text{cl,eff}} n_{\text{cl,m,eff}}) , \qquad (7)$$

式中, ζ_{co.eff} 和 ζ_{cl.eff} 分别表示纤芯和包层的有效热光 系数, n_{co.eff} 表示纤芯模的有效折射率。

从式(4)和式(7)可以看出特征波长值与折射 率、温度的变化成不同的比例,对两个参量的响应灵 敏度不同。所以,可以通过监测干涉波谷的波长偏 移量来计算折射率和温度的变化值。

1.2 数值模拟

当光从 SMF 传输到 MMF 时,多个高阶模式被 激发。由于多模干涉效应,沿着光的传输方向,MMF 内的光场发生周期性的变化。入射光沿传输方向传 输一定距离后,在某一位置的光场与入射光场几乎 完全一样,这种现象就是自映像效应,这段传输距离 称为自映像周期^[12]。自映像周期可表示为:

$$l = p \, \frac{na^2}{\lambda} \,, \tag{8}$$

式中, *l* 为自映像周期, *p* 为自映像周期数, *n* 为传输 光波导的折射率, *a* 为光波导的直径大小, *λ* 为光源 中心波长。可以看出, 当光波导的折射率、直径大小 改变时, 光纤内光场会发生变化, 自映像周期也发生 变化。

利用 RSoft 软件的 BeamPROP 模块,对直径为 50/125 μ m、105/125 μ m 的阶跃型 MMF 以及直径为 6/80 μ m 的 TCF 进行模拟计算。模拟的基本参数如 表 1 所示。

表 1 光纤参数 Tab. 1 Parameters of optical fibers

Types of optical fiber	SMF	MMF1	MMF2	TCF
Refractive index of core	1.4682	1.4667	1.4667	1.4650
Diameter of core/ μ m	8.2	105	50	6
Refractive index of cladding	1.4628	1.4060	1.4060	1.4450
Diameter of cladding/ μ m	125	125	125	80

将 SMF 分别与 1 cm 长的直径为 50/125 μm 的 MMF、4.3 cm 长的直径为 105/125 μm 的 MMF 和 5 cm 长的直径为 6/80 μm 的 TCF 相连进行模拟计 算,得到 3 种光纤的光场幅度分布图和光纤中心功 率分布图如图 2 所示。由光纤幅度分布图可知,光 场能量在 SMF 中主要集中在纤芯内部。光传输到 MMF 时,由于纤芯失配,高阶模式被激发,不同的模 式在纤芯内发生干涉,光波叠加引起光强度的重新 分布。从图 2(a)和图 2(b)中可以看出两种 MMF 中 都出现了周期性传导的现象,直径为 50/125 μm、 105/125 μm 的 MMF 的自映像周期分别为 2.466 mm、10.654 mm。由于 TCF 的纤芯直径较接近输入 SMF,其自映像周期很小且光功率变化很小,在模拟 图 2(c)中无法观察到其周期性传导现象,故将 TCF 具体参数代入式(8),得到直径为 6/80 μm 的 TCF 的自映像周期为 0.034 mm。为了耦合更多的光参 与干涉并输出,一般选取传感结构中各段光纤长度 分别为其自映像周期的整数倍,但考虑到实验条件, 实验精度仅为 mm 级别,所以最终确定该传感 器结构中MMF1、TCF和MMF2的长度分别为 11 mm、15 mm和7 mm。

确定各光纤段的长度之后完成传感器的制作, 得到的传感器透射谱如图 3 所示,透射谱中干涉条 纹清晰,条纹对比度最大达到 0.302,可以满足本文 实验的测量需求,选取 1595 nm 和 1615 nm 左右的 两个波谷作为特征波谷,分别记为 Dip1 和 Dip2。





Fig. 2 Diagram of optical field amplitude distribution and optical fiber center power distribution



图 3 传感器透射谱



2 实验结果与分析

2.1 折射率传感实验

图 4 为折射率测量系统,电源为稳压电源(regulated power supply, RPS),光源使用 SLED 宽谱光 源,宽谱光源连接隔离器(isolater, ISO)后连接传感 器结构的入射光纤,传感器的出射光纤连接光谱分 析仪(optical spectrum analyzer, OSA), OSA 的分辨 率为 0.02 nm。实验中将传感头固定在 U 型槽内, 这样可以把传感头充分浸入氯化钠溶液中,同时避 免其受压力、弯曲等外界因素的影响。





将温度控制在 25 ℃不变,配置不同浓度的氯化 钠溶液,利用经验公式计算其折射率并进行标定,得 到折射率不同的溶液,表 2 为不同浓度氯化钠溶液 与折射率的一一对应关系。

表 2 氯化钠溶液浓度与折射率对应表

Tab. 2 Corresponding relation between concentration of sodium chloride solution and refractive index

Concentration of sodium chloride solution/%	Refractive index /RIU
0	1.333
5.0	1.342
9.1	1.350
16.7	1.360
20.0	1.370
25.0	1.380

首先将蒸馏水滴在传感头上,使传感头完全浸 没,等透射谱稳定之后记录数据,然后将蒸馏水吸 出,用配置好的氯化钠溶液完全覆盖传感头,等待 10 min,透射谱稳定之后记录数据。之后使用注射器吸 出氯化钠溶液,用蒸馏水清洗 U 型槽和传感头,晾干 之后依次加入不同折射率的溶液直至完成表 2 中所 有折射率的测量实验,每次更换溶液之前均先进行 清洗。

图 5 为不同折射率下的传感器透射谱,从图中 可以看出,随着外界环境折射率的增加,Dip1 和 Dip2 向短波长方向偏移,与理论研究相符。当折射 率从 1.333 升高到 1.380 时,Dip1 和 Dip2 的偏移量 分别为-1.932 nm 和-1.688 nm。



different refractive indices

处理实验数据,得到两个特征波谷随着折射率 增大的波长偏移情况,如图6所示,Dip1与Dip2波





长的折射率灵敏度分别为一44.944 nm/RIU 和 -33.836 nm/RIU,对应的线性拟合度分别为 0.9741和 0.9460。由于光谱仪的分辨率为 0.02 nm,计算得 Dip1 和 Dip2 波长的折射率分辨率分别 为 4.45×10⁻⁴和 5.91×10⁻⁴。

2.2 温度传感实验

温度传感系统如图 7 所示,使用的温度保持装 置为装有蒸馏水的水浴加热槽(water-bath heater), 传感器在加热槽中保持水平,保证其不受压力、弯曲 等因素影响。进行实验时,从 30 ℃开始,控制加热 槽的温度均匀加热到 65 ℃,以 5 ℃为步进记录传感 器透射光谱,当温度达到记录点之后,等待 10 min 使 透射光谱稳定。



图 8 为不同温度下的传感器透射谱,从图中可 以看出,随着温度的升高,Dip1 和 Dip2 向长波长方 向偏移,与理论分析一致。当温度从 30 ℃升高到 65 ℃时,Dip1 和 Dip2 的波长偏移量分别为 2.520 nm 和 3.032 nm。



Fig. 8 Sensor transmission spectrum at different temperatures

处理实验数据,得到两个特征波谷的波长偏移 量与温度对应关系,如图 9 所示, Dip1 和 Dip2 波长 的温度灵敏度分别为 0.074 nm/℃和 0.083 nm/℃, 线性拟合度分别为 0.9837 和 0.9841,两个波谷的温 度分辨率分别为 0.27 ℃和 0.24 ℃。



2.3 结果分析

本文中传感器的 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量与 折射率和温度的变化对应关系不同,因此可以建立 灵敏度矩阵,实现双参量的同时测量。当外界环境 的折射率和温度同时发生变化时,波谷的波长偏移 量可以表示为^[13-15]:

 $\Delta \lambda = K_{RI} \Delta n + K_T \Delta T$, (9) 式中, K_{RI} 表示该波谷的折射率灵敏度, K_T 表示该 波谷的温度灵敏度,则 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量与 外界环境中折射率、温度变化量的关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1,\text{RI}} & K_{1,\text{T}} \\ K_{2,\text{RI}} & K_{2,\text{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (10)$$

求式(10)的逆矩阵

$$\begin{vmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{vmatrix} =$$

$$\frac{1}{|K_{1,\mathrm{RI}}K_{2,T} - K_{2,\mathrm{RI}}K_{1,T}|} \begin{bmatrix} K_{2,T} & -K_{1,T} \\ -K_{2,\mathrm{RI}} & K_{1,\mathrm{RI}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \circ$$
(11)

将实验得到的灵敏度代入式(11),得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{1.2152} \begin{bmatrix} 0.0829 & -0.0742 \\ 33.836 & -44.944 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} .$$
(12)

因此,只需要测量该传感器透射谱中 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量,代入式(12)计算即可得到折射 率和温度的变化量,从而实现双参量的同时测量。

3 结 论

本文提出了一种基于 MZI 干涉结构的折射率和

温度同时测量传感器,传感器结构为单模-多模-细 芯-多模-单模。当折射率和温度发生变化时,两个特 征波谷的波长偏移量不同,通过监测透射谱中两个 特征波谷的波长偏移情况,构建灵敏度矩阵,实现双 参量的同时测量。实验结果表明,两个特征波谷的 波长在 1.333—1.380 的折射率范围内灵敏度分别 为-44.944 nm/RIU 和-33.836 nm/RIU;当温度 在 30—65 ℃范围内变化时,两个波谷的波长灵敏度 分别为 0.0742 nm/℃和 0.083 nm/℃。该传感器结 构简单、线性度高、体积小,在食品安全、海洋监测、 生物医学等领域有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] ZONG S Y, WEN X Y, ZHANG D S. Fiber Mach-Zehnder temperature index dual-parameter sensor based on fiber core mismatch and dislocation fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17):170607.
 宗书尧,文晓艳,张东生.基于纤芯失配与错位熔接的光 纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器[J].激光 与光电子学进展, 2020, 57(17):170607.
- [2] JIAO T, MENG H Y, DENG S Y, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a Mach-Zehnder interferometer with forward core-claddingcore recoupling[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 111:612-615.
- WU B C, BAO H Y, ZHOU Y F, et al. Temperature dependence of a refractive index sensor based on a bent core-offset in-line fiber Mach-Zehnder interferometer[J].
 Optical Fiber Technology, 2021, 67:102748.
- [4] YAO Q Q, MENG H Y, WANG W, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber bragg grating[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 209:73-77.
- [5] HU Y H, DONG H Y, JIANG C, et al. Multi-functional optical fiber sensor composed of hard plastic cladding optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (7):070605.

胡义慧,董航宇,江超,等.硬塑料包层光纤构成的多功 能光纤传感器[J].激光与光电子学进展,2018,55(7): 070605.

- [6] WANG F, PANG K, MA T, et al. S-shaped refractometer based on dual tapered no-core fiber for low-range refractive index measurement [J]. Optics Communications, 2020,463:125419.
- [7] TAO W Q, JIANG C, GUO X S. LPFG and core-less fiber cascade sensor for simultaneous measurement of refrac-

tive index and temperature[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(8): 812-817.

陶武强,江超,郭小珊.LPFG 与无芯光纤级联的折射率 与温度同时测量传感器[J].光电子·激光,2021,32 (8):812-817.

- [8] MUMTAZ F, CHENG P, LI C, et al. A design of taper-like etched multicore fiber refractive index-insensitive a temperature highly sensitive Mach-Zehnder interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13):7074-7081.
- [9] ZHU X J.LI S.SUN D.et al. High sensitivity temperature and curvature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with tapered two peanut-shaped structures[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5):4135-4143.
- [10] LI D Q, CAO Y, GONG S S, et al. Interferometric optical fiber sensor based on fine core optical fiber and double sphere structure[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(6):857-860.
 李德强,曹晔,宫顺顺,等.基于细芯光纤与双球结构的 干涉型光纤传感器[J]. 传感技术学报, 2018, 31(6): 857-860.
- [11] GIANLUCA C, VITTORIA F, JOEL V, et al. Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1 000 °C [J]. Optics Express, 2017, 17(24): 21551-21559.

- [12] YANG H Y,LIU M Y,LI Y K, et al. High sensitivity multimode interferency-heterogeneous coreless fiber refractive index sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020,41(5):652-657.
 杨宏艳,刘孟银,李叶柯,等.高灵敏度多模干涉一异质 无芯光纤折射率传感器[J].半导体光电,2020,41(5): 652-657.
- [13] LI X G, LINH V N, MARTIN B, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index using an exposed core micro structured optical fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26 (4):1-7.
- [14] ZHAO Y, ZHAO J, Peng Y, et al. Simultaneous measurement of seawater salinity and temperature with composite fiber-optic interferometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:1-8.
- [15] WU Y F,LIU B,NAN T, et al. Fiber optic hybrid structure based on an air bubble and thin taper for measurement of refractive index, temperature, and transverse load [J]. Optik, 2021, 241:166962.

作者简介:

李永倩 (1958-),男,工学博士,教授,主要从事光通信与光传感技 术方面的研究.