

文章编号:1001-5078(2024)11-1799-06

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于光纤感知的盐深传感系统设计

梁芳^{1,3}, 廖建军², 荀燕琴³, 付建梅³

(1. 海南大学 电子科学与技术学院, 海南海口 570228; 2. 海南大学 环境科学与工程学院, 海南海口 570228;

3. 忻州师范学院 电子系, 山西 忻州 034000)

摘要:为了同时检测盐度与深度,并且抑制温度对测试的交叉敏感问题,设计了一种基于不同封装光纤传感器联用的盐深传感系统。三种不同封装形式的光纤传感器通过光纤串联实现盐度深度温度的同时测量与解算。构建了盐度和深度的反演模型,分析了温度补偿的可行性。实验分别针对盐度、深度及温度的变化进行了测试。结果显示,在0~50 g/L的盐度测试中,系统灵敏度均值为 $128.7 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$,主峰与盐度变化的第一个主峰波长偏移的变化线性度为0.9654。在1~15 cm的深度测试中,随深度变化的平均波长偏移量为 751.9 pm/cm ,线性度为0.9931;在23~45 °C的温度测试中,三个光纤传感器的温度响应基本一致,在采用FBG2的测试数据进行温度补偿后,LPG和FBG1的波长偏差仅有 $\pm 10 \text{ pm}$ 。

关键词:光纤传感;盐度检测;深度检测;交叉敏感;温度补偿

中图分类号:TP212 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.022

Design of salt depth sensing system based on fiber optic sensing

LIANG Fang^{1,3}, LIAO Jian-jun², XUN Yan-qin³, FU Jian-mei³

(1. College of Electronic Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

3. Department of Electronics, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China)

Abstract: To simultaneously detect salinity and depth without temperature interference, a salt depth sensing system based on different packaged fiber sensors was designed. Three different packaging forms of fiber sensors are connected in series to achieve calculation of salinity depth and temperature. Constructed inversion models for salinity and depth, and analyzed the feasibility temperature compensation. The experiment tested the changes in salinity, depth, and temperature separately. The results showed that in the salinity test of 0~50 g/L, the average sensitivity of the system was $128.7 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$, and the linearity of the wavelength shift between the main peak and the first main peak of salinity change was 0.9654. In the depth test of 1~15 cm, the average wavelength shift with depth is 751.9 pm/cm , and the linearity is 0.9931; In the temperature test of 23~45 °C, the temperature response of the three fiber optic sensors was basically consistent. After temperature compensation using FBG2 test data, the wavelength deviation of LPG and FBG1 was only $\pm 10 \text{ pm}$.

Keywords: fiber optic sensing; salinity detection; deep detection; cross sensitivity; temperature compensation

基金项目:海南省自然科学基金项目(No. 224MS004);山西省高等学校教学改革创新项目(No. J20231136)资助。

作者简介:梁芳(1987-),女,博士研究生,讲师,研究方向为光纤传感、检测技术与自动化,集成电路设计技术。

E-mail: liangfang423@sina.com

通讯作者:廖建军(1981-),男,博士,教授,研究方向为电化学传感器及系统集成技术。E-mail: liaojianjun008@163.com

收稿日期:2024-07-20; **修订日期:**2024-09-06

1 引言

海洋环境监测对国防安全、资源合理利用等领域都具有重要意义^[1]。传统海洋参数检测以电学传感为主,如温盐深仪,其优势是精度高、稳定性好,缺点是价格昂贵、布放难度大且易受电磁干扰。随着对海洋资源的不断开发,需要测试的区域、点位大量增长,传统的温盐深仪要组成大范围传感阵列,其电路采集部分结构复杂,海洋中复杂环境会大幅降低其可靠性。相比之下,光纤传感网络在此方面具有显著优势^[2]。光纤传感是无源的,避免了电磁干扰、短路等风险,其尺寸小、质量轻、成本低,网络集成度高,更适用于海洋环境参数监测。

国内外对基于光纤的温盐深传感这一热点问题展开了研究。Nguyen^[3]设计了一种基于光纤 Faber-Perot (F-P) 腔的盐度传感器,其灵敏度达 $0.68 \text{ pm}/\%$ 。Vigneswaran^[4]采用“对环芳烷”制作光纤传感器的封装材质,对海水盐度的响应度为 $540 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。赵勇^[5]利用光纤 SPR 效应同时解耦温度($1.8 \text{ nm}/\text{C}$)、压力($2.8 \text{ nm}/\text{MPa}$)和盐度($0.56 \text{ nm}/\%$)信息,实现了多参数检测。王晶^[6]提出了一种四端口耦合结构,可实现温盐度同时测量,灵敏度为 $114.8 \text{ pm}/\%$ 和 $-0.745 \text{ nm}/\text{C}$ 。方莎莎^[7]将极化模数干涉仪与光纤 Sagnac 干涉仪联用,获得了温度与应变的高灵

敏度测试结果。沈亮^[8]采用微管腔结构激发谐振模式,增强了信噪比,盐度灵敏度可达 $36.5 \text{ pm}/\%$ 。王宇琦^[9]在光纤光栅上涂覆聚酰亚胺使其对盐度具有敏感性,该设计具有较好的线性度和重复性。张雨微^[10]提出了一种基于法布里-珀罗干涉仪级联马赫-曾德(M-Z)干涉仪的混合干涉型光纤温盐深传感器,温盐深测试精度分别为 $1.31 \text{ nm}/\text{cm}$ 和 $-35.16 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。杜超^[11]设计了双峰谐振的长周期光纤光栅用于测试海水盐度,通过谐波抑噪的方法使系统灵敏度达到 $27.9 \text{ pm}/\%$ 及 $0.58 \text{ nm}/\text{C}$ 。

综上所述,传统电传感型设备难以保障大范围海洋区域的高精度、低成本、高稳定性的组网监测需求。现有光纤传感器多采用 F-P 腔、M-Z 干涉具等手段可以提供高精度盐深信息,但多数文献采用的是异构光纤传感结构,这样大幅降低了其稳定性,本文针对此问题,设计了基于独立稳定结构并行测量再采用分离算法解耦干扰的方式,在保证测试精度的条件下,提升了系统稳定性。

2 系统设计

系统由扫频激光器、光隔离器、光耦合器、光纤传感器、采集卡、解调模块和电脑组成,系统整体结构如图 1 所示。

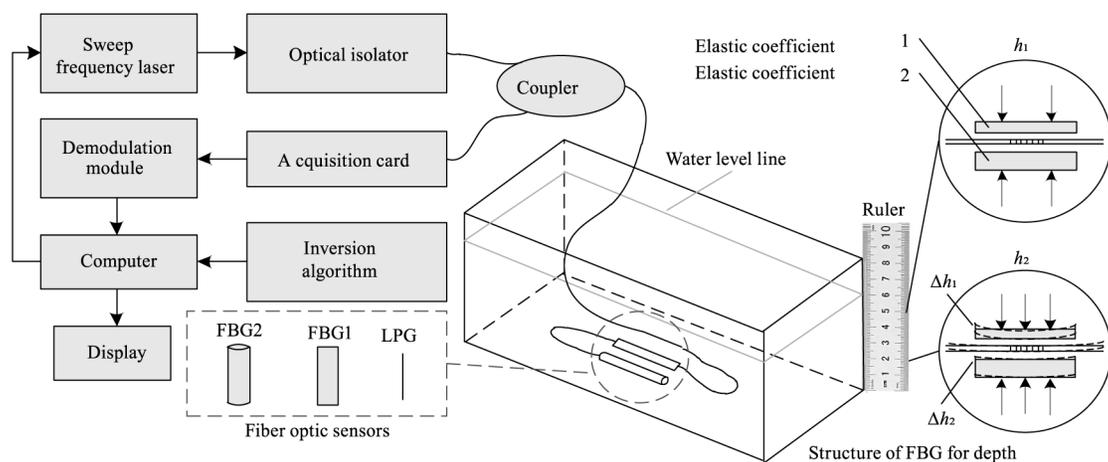


图 1 基于光纤传感的盐深传感系统

Fig. 1 Salt depth sensing system based on FBGs combination

如图 1 所示,电脑控制扫描激光器输出激光,激光通过光隔离器进入光耦合器,光耦合器通过光纤到达测试区域的光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器和长周期光纤光栅传感器(Long Period Fiber Grating, LPG),依次经过 LPG、FBG1、

FBG2。LPG 的透射光谱用于测试折射率从而反演液体的盐度;FBG1 用于测试水位深度,通过 FBG 两端封装结构不同使其对不同深度水压敏感,从而反演液体深度;FBG2 用于温度漂移补偿,因为 LPG 与 FBG 都会受到待测液体温度的影响,所以

为了解决温度的交叉敏感问题,采用圆柱封装温度敏感型 FBG 进行温度补偿。三个光纤传感器采集的信号会通过耦合器进入采集卡和光谱解调模块,然后利用反演算法完成盐度与深度信息的解算,最终显示输出。

3 工作原理

3.1 盐度解算模型

LPG 是透射式光栅,由于溶液中盐度不同时,其折射率也不同,所以可以根据折射率推算溶液的盐度值。对于纤芯与包层模的耦合而言,其谐振波长有:

$$\lambda_x = [n_{\text{core}}(n_1, n_2) - n_{\text{cladding}}(n_2, n_3)]\Lambda \quad (1)$$

其中, λ_x 为谐振波长; n_{core} 为光纤芯导模的有效折射率; n_{cladding} 为光纤包层的有效折射率; Λ 为光纤光栅的周期; n_1 、 n_2 和 n_3 分别为纤芯、包层和测试环境的折射率。

光纤芯导模折射率可通过色散方程计算得到。在弱导光纤中,设其包层的半径 (r_{cladding}) \gg 光纤芯径 (r_{fiber}), 则其折射率可表示为:

$$n_{\text{cladding}}^i(n_2, n_3) = n_2 - \left[1 - \frac{\lambda_0}{\pi \cdot r_{\text{cladding}}} \sqrt{n_2^2 - n_3^2} \right] + \Delta n_2 \left(\frac{r_{\text{fiber}}}{r_{\text{cladding}}} \right) \quad (2)$$

式中, λ_0 为初始波长值。将式(1)中对应的波长代入式(2)后,可以计算 LPG 谐振波长偏移量与折射率的关系有:

$$\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda'_i = \frac{U\Lambda\lambda_0^3}{8\pi^3 n_2^3 r_{\text{cladding}}^3} \left[(n_2^2 - n_3'^2)^{-\frac{1}{2}} - (n_2^2 - n_3^2)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

其中, U 为光纤芯的横向传播系数, n' 为环境溶液盐浓度变化后对应的折射率。同时,溶液盐度与折射率存在线性关系,盐度反演系数为 k_1 , 则盐度可表示为:

$$c_{\text{salt}} = kn'_3 \quad (4)$$

3.2 深度反演

深度测量通过 FBG1 实现,该 FBG 采用两侧不同封装实现,两侧的封装材料分别具有不同的形变弹性系数,当进入水中时,由于不同水深收到的压力不同,水压在向上和向下两个方向的大小是相同的,但是由于 FBG 封装结构上下材料弹性系数不同,所以相同压力产生的形变量不同,故随着水深的变化,FBG 上下的弯曲程度不同,导致

FBG 的回波波长偏移量产生变化。FBG 变化前后如图 1 中右侧两个小图所示,形变程度由 Δh_1 和 Δh_2 决定。设回波中心波长为 λ_B , 则其可表示为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, n_{eff} 为折射率, Λ 为光栅周期。FBG 的波长偏移量可表示为:

$$\Delta\lambda_B = [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\Delta\varepsilon]\lambda_B \quad (5)$$

式中, α 、 ξ 和 p_e 分别是光纤的热膨胀系数、热光系数和弹光系数。当温度不变时,波长偏移量为应变的线性函数,也是深度的线性函数。故:

$$h = k_2(\alpha + \xi)\Delta T\lambda_B \quad (6)$$

式中, k_2 为深度反演系数,可以通过已知深度的波长偏移量测试进行标定得到。

3.3 温度补偿

为了使 3.2 节中的温度成为常数,解决溶液温度漂移造成的交叉敏感问题,采用 FBG2 单独获取温度,并完成对 LPG 和 FBG1 的温度漂移补偿。由于 FBG2 采用圆柱形钢管结构封装设计,其没有使纤芯与溶液接触,故盐度对折射率无影响。同时,由于圆柱形钢管封装的对称结构,使其随深度不同的应力被均匀抵消,从而压力(深度)不敏感,故其波长偏移量表示为:

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B(\alpha + \xi)} \quad (7)$$

由此可以看出,采用 FBG2 的波长偏移量补偿 LPG 与 FBG1 的温度漂移,即可获得准确的盐度反演值和深度反演值。

4 实验

4.1 模拟实验条件

盐深检测系统如图 2 所示,主要分为采集部分(光纤传感器和采集卡)、处理部分(解调模块、数据转换端口及电脑)和测试区域(水缸、称重计与刻度尺)。首先,在水缸中加入已知深度的水位,静置至水位平稳后,记录 FBG1 和 FBG2 的中心波长值。通过每次加入固定量的水使缸内深度线性增加,从而记录 FBG1 的波长偏移量,完成对深度反演的标定。同理,在固定水位不变的情况下,通过增加食盐的质量,搅拌均匀后形成已知浓度的盐水,再随着增加盐的质量控制盐水浓度比例逐步增大,从而获取 LPG 不同盐度下的波长偏移量完成盐度测试标定。其中 FBG2 的测试数据用于计算温度偏移量,进行温度补偿。

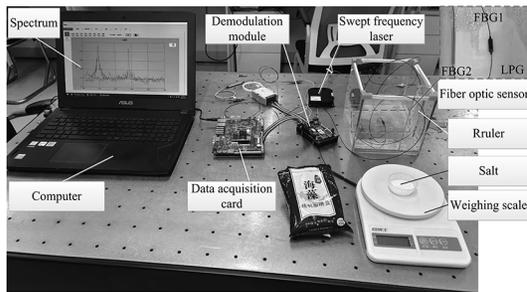
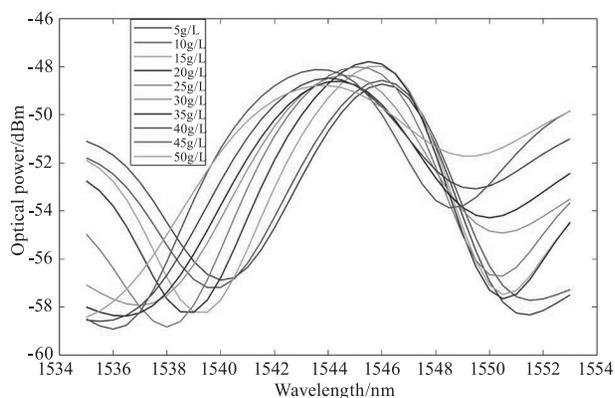


图2 基于光纤传感的盐深检测系统

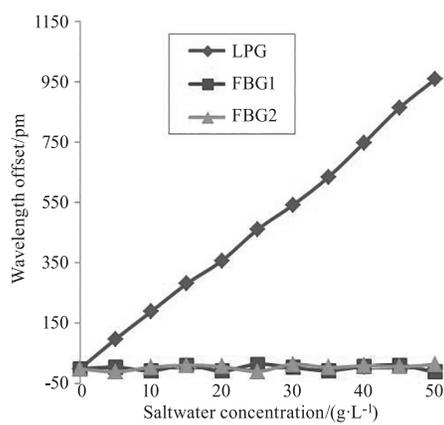
Fig. 2 Salt depth detection system based on fiber optic sensing

4.2 盐度检测的透射谱分析

在测试水缸中注入 1 L 的水,通过称重计每次称取 5.0 g 的盐溶于水,共计 10 次,则测试浓度范围为 0~50 g/L(0~5.0%),采样间隔为 5.0 g/L。则 LPG 的光谱响应曲线如图 3(a) 所示,其盐度随波长的函数如图 3(b) 所示。



(a) 不同盐度的透射光谱



(b) 波长偏移量随盐度的变化

图3 基于光纤传感器的盐度测试

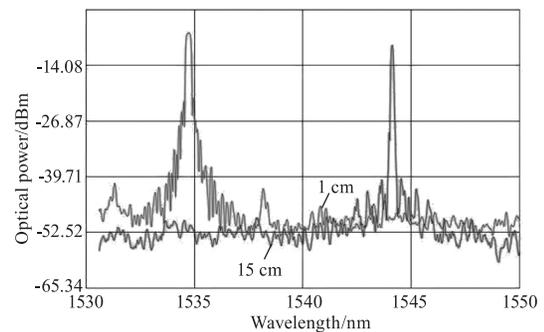
Fig. 3 Salinity testing based on fiber optic sensors

如图 3(a) 所示,当待测溶液的盐度不断增加时,透射光谱的变化十分明显,其两个吸收峰位置的中心波长偏移随折射率(盐度不同对应的折射率不同)变化明显。在 0~50 g/L 的变化过程中,两个吸

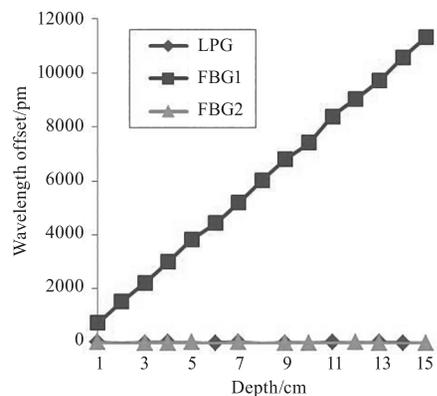
收峰的主峰位置分别从 1545.025 nm 和 1551.458 nm 漂移至 1536.485 nm 和 1549.325 nm,灵敏度均值为 $128.7 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其中第一个主峰波长偏移的变化线性度为 0.9654,可以很好地反演盐度。整个变化过程中,光功率的从 -48.7 dBm 衰减至 -61.5 dBm,在可识别范围内。如图 3(b) 所示,在盐度的整个变化过程中,LPG 的波长偏移量与盐度变化呈线性,线性度为 0.9981,说明波长偏移值可以很好地反演盐度。

4.3 深度检测反射谱分析

FBG1 被固定于水缸底部,初始水位为 1 cm,水深每增加 1 cm 使水面完全平静后测试 FBG1 的波长偏移量。本系统拟应用于实验室内小型工业原料配制反应罐中,其罐体深度约 20 cm,反应溶液最大约占罐体 3/4,故测试深度设置为 15 cm。给出水深 1 cm 和 15 cm 的光谱图(其他深度的光谱图类似),如图 4(a) 所示,两条曲线分别是水深 1 cm 和 15 cm 时的回波主峰。



(a) 不同深度时FBG1的波长偏移量



(b) 波长偏移量随深度的变化

图4 不同深度时FBG1的波长偏移量

Fig. 4 Wavelength offset of FBG1 at different depths

由图 4 可知,在 1 cm 到 15 cm 的液位深度变化过程中,中心波长从 1534.658 nm 偏移至 1545.184 nm,随深度变化的平均波长偏移量为 751.9 pm/cm 。其光

功率没有明显变化,说明深度增加会导致 FBG1 封装结构应力不均匀从而使中心波长发生偏移,但并不会造成回波信号衰减。将三个光纤传感器的回波波长偏移量随深度的响应值进行对比,如图 4(b)所示,计算 FBG1 的线性度为 0.9931, LPG 和 FBG2 几乎不受深度影响。测试温度的 FBG2 随深度变化时中心波长几乎没有偏移,验证了其圆柱形封装结构对液位深度不敏感。

4.4 温度补偿

测试环境为水缸(盐度为 25 g/L,水深 10 cm),将 50 °C 的水倒入水缸静置平稳后,当其温度为 45 °C 时,每降低 1 °C 记录 3 个光纤传感器的中心波长变化量,直至室温 23 °C。三个光纤传感器的测试结果如图 5(a)所示,经温漂标定后的盐度和深度光纤传感器的温度响应曲线如图 5(b)所示。

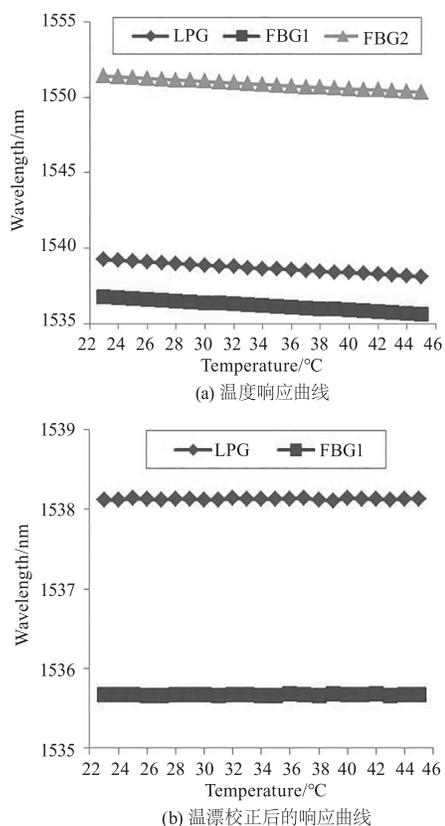


图5 光纤传感器随温度变化的响应及校正后的响应
Fig.5 Response of fiber optic sensor to temperature changes and corrected response

由图 5(a)可知,FBG1 与 FBG2 的变化率相似,均在 50 pm/°C 左右,即温度响应效果几乎一致,则将 FBG2 的响应数据负向叠加即可实现对 FBG1 温度漂移的补偿。对于 LPG 而言,变化率为 63 pm/°C,但由于其线性度也在 0.98 以上,故只要

将 FBG2 的变化率乘以 1.26 (63 pm/°C ÷ 50 pm/°C) 的比例系数,则同样可以很好地完成温度补偿。由图 5(b)可知,经温度补偿后的 LPG 和 FBG1 响应波长偏差仅有 ±10 pm,基本不受温度影响。

通过加水过程和减水过程完成重复测量,并计算正行程和逆行程对应水位上的波长值,分析系统的稳定性。测试结果中,最大波长偏差值为 32 pm/cm,偏差均值为 26.5 pm/cm,相比 751.9 pm/cm 的响应度,该波长偏移误差小于 3.5%,说明系统具有很好的稳定性。将本系统测试结果与同类型 FBG 传感测试的文献[6]、文献[11]进行对比,如表 1 所示,在主要测试指标中具有一定优势。

表 1 与相似研究内容的结果对比

Tab.1 Comparison of results with similar research content

Reference	Salinity/ (pm/%)	Depth/ (pm/cm)	Temperature/ (pm/°C)
Reference[6]	114.8	/	-745
Reference[11]	27.9	326	580
Ours	128.7	751.9	50

由表 1 可以看出,本系统的盐度精度略优于文献[6],明显优于文献[11];深度精度优于文献[11],文献[6]不能测试深度;而温度敏感度本系统弱于前两篇文献,但本文应用领域中温度作为标定温漂使用,故对系统性能影响较小,综合比较本系统具有更好的测试性能。

5 结论

本文针对溶液盐度、深度、温度的互扰问题,提出了一种光纤传感器组合的检测方法。采用 LPG 与 FBG 联用,并利用不同封装结构形式,使三个光纤传感分别对盐度和深度敏感,再通过温度补偿的方式获取准确的盐度和深度测试值。实验分别对不同盐度、不同深度和不同温度变化进行了测试,结果显示,本系统可以很好地进行温度补偿,补偿后的 LPG 和 FBG1 的数据可以反演盐度与深度信息,并且线性度高。通过正、逆行程液位高度变化验证了系统具有较好的稳定性。

参考文献:

- [1] Wang Jin, Wang Yongjie, Zhang Dengpan, et al. Research progress of fiber Bragg grating temperature sensors for o-

- cean application [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(5): 515–522. (in Chinese)
- 王璿,王永杰,张登攀. 面向海洋应用的光纤光栅温度传感器研究进展[J]. *激光与红外*, 2019, 49(5): 515–522.
- [2] Ding Baoyan, Zhao Qiang, Chen Dongying, et al. Technology and application progress of fiber bragg grating pressure sensing [J]. *Study on Optical Communications*, 2024, 243(3): 71–82. (in Chinese)
- 丁宝艳,赵强,陈东营,等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展[J]. *光通信研究*, 2024, 243(3): 71–82.
- [3] Nguyen L V, Vasiliev M, Alameh K. Water salinity fiber sensor with selectable sensitivity using a liquid fillable composite in-fiber Fabry-Perot cavity [C]//7th International Symposium on High-capacity Optical Networks and Enabling Technologies, December 19–21, 2010, Cairo, Egypt. New York: IEEE Press, 2010: 161–165.
- [4] Vigneswaran D, Ayyanar N, Sharma M, et al. Salinity sensor using photonic crystal fiber [J]. *Sensors and Actuators A*, 2018, 269: 22–28.
- [5] Zhao Y, Wu Q L, Zhang Y N. Simultaneous measurement of salinity, temperature and pressure in seawater using optical fiber SPR sensor [J]. *Measurement*, 2019, 148: 106792.
- [6] Wang Jing, Yang Lei, Liao Yipeng, et al. Study on microfiber coupler for simultaneous measurement of seawater salinity and temperature [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(10): 140–145. (in Chinese)
- 王晶,杨磊,廖毅鹏,等. 同时测量海水盐度温度的微光纤耦合器研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(10): 140–145.
- [7] Fang S S, Wu X Q, Zhang G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106004.
- [8] Shen Liang, Jiang Junfeng, Wang Shuang, et al. Study of optical fiber laser salinity sensor based on microtube cavity [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2022, 33(1): 1–8. (in Chinese)
- 沈亮,江俊峰,王双,等. 基于微管腔的光纤激光盐度传感研究[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(1): 1–8.
- [9] Wang Yuqi, Pan Zhen, Ji Yadian, et al. Quasi-distributed temperature and salt sensor based on drawing tower grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(4): 33–43. (in Chinese)
- 王宇琦,潘震,戢雅典,等. 基于拉丝塔光纤光栅的准分布式温盐传感器[J]. *光子学报*, 2023, 52(4): 33–43.
- [10] Zhang Yuwei, Li Yongqian, Yao Guozhen, et al. Design of optical fiber temperature-salinity-depth sensor based on hybrid interference structure [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(4): 88–91. (in Chinese)
- 张雨微,李永倩,姚国珍,等. 基于混合干涉结构的光纤温盐深传感器设计[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(4): 88–91.
- [11] Du Chao, Zhao Shuang, Song Huake, et al. A seawater salinity sensor based on dual peaks resonance long period fiber grating [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 291–299. (in Chinese)
- 杜超,赵爽,宋桦可,等. 基于双峰谐振长周期光纤光栅的海水盐度传感器[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(2): 291–299.