

DOI:10.16136/j.joel.2022.01.0282

基于微管腔的光纤激光盐度传感研究

沈亮^{1,2}, 江俊峰^{1,2,3*}, 王双^{1,2,3}, 张建德⁴, 杨宁⁴, 刘铁根^{1,2,3}

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072; 3. 天津市光纤传感工程中心, 天津大学光纤传感研究所, 天津 300072; 4. 山东航天电子技术研究所, 山东烟台 264000)

摘要: 基于光学无源方案的光纤盐度传感器中光与物质的相互作用长度受限, 且通常需要单独的流体通道设计, 增加了检测复杂度, 为此提出了一种基于薄壁微管腔和环腔结构的光纤激光盐度传感器。将薄壁微管腔作为盐度敏感单元和光滤波器, 与掺铒光纤相接构成光纤环形谐振腔。通过拉锥光纤耦合在薄壁微管腔激发出回音壁谐振模, 其中心波长与盐度线性对应, 实现薄壁微管腔内溶液盐度的传感测量。与无增益的微管腔透射谱相比, 激光可以提供具有更高信噪比和更窄线宽的传感信号。实验结果表明, 在 0%—45% 盐度范围内, 提出的光纤激光盐度传感器的传感灵敏度为 36.5 pm/‰, 线性度达到 0.99924, 盐度测量误差小于 ±0.7513‰, 最小探测极限为 0.4855‰, 且不需要额外的流体测量通道, 有望成为海洋盐度探测的有力工具。

关键词: 光纤传感器; 光学谐振腔; 回音壁模式; 海水盐度

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)01-0001-08

Study of optical fiber laser salinity sensor based on microtube cavity

SHEN Liang^{1,2}, JIANG Junfeng^{1,2,3*}, WANG Shuang^{1,2,3}, ZHANG Jiande⁴, YANG Ning⁴, LIU Tiegeng^{1,2,3}

(1. Department of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Engineering Center of Optical Fiber Sensing, Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Institute of Shandong Aerospace Electronics Technology, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: The length of interaction between light and material is limited in the fiber optics salinity sensors based on optical passive scheme, and a separate design of fluid channel is usually required, which increases the detection complexity. Therefore, an optical fiber laser salinity sensor based on thin-walled microtube and ring cavity is proposed. The thin-walled microtube cavity is used as the salinity sensitive unit and optical filter, and is connected with the erbium-doped fiber to form a fiber ring cavity. The whispering gallery mode is excited in the thin-walled microtube cavity through the coupling of tapered optical fibers. The central wavelength is linearly corresponding to the salinity, which realizes the measurement of salinity of solution in the thin-walled microtube cavity. Compared with the transmission spectrum of thin-walled microtube without gain, laser can provide sensing signal with higher signal-to-noise ratio and narrower linewidth. Experimental results show that the sensitivity and the minimum detection limit of the proposed fiber laser salinity sensor are 36.5 pm/‰ and 0.4855‰, respectively, during the salinity range of 0%—45%, the linearity is 0.99924, and the salinity measurement error is less than ±0.7513‰, and does not require additional fluid channel, which is expected to become a useful tool for ocean salinity de-

* E-mail: jiangjfjxu@tju.edu.cn

收稿日期: 2021-04-27 修订日期: 2021-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61735011, 61675152)、科技部重大科学仪器开发专项(2013YQ030915)、载人四期预研项目资助、天津市高层次创新创业团队人才发展特支计划和天津 131 创新人才第一层次培养计划资助项目

tection.

Key words: optical fiber sensor; optical resonator; whispering gallery mode; seawater salinity

1 引 言

盐度是海水的重要参数之一,其精确测量对于海洋环境监测和海洋探测等科学活动^[1]具有重要意义。海水绝对盐度(单位:g/kg 或‰)为每千克海水溶解盐类物质的质量,但由于绝对盐度不便于直接测量,海洋测量领域普遍使用基于电导率的海水盐度测量方法和实用盐度标准,典型海水盐度范围为 2 PSU—42 PSU(practical salinity unit, PSU,实用盐度单位),对应绝对盐度的范围不超过 0‰—45‰^[2]。基于电导率的海水盐度电学传感器容易受到电磁干扰,且较易受恶劣环境影响。由于光纤传感器具有纤细、耐腐蚀和长距离查询信号保真度高等优点,近年来研究人员提出了光纤盐度传感的多种传感机制^[3-9],如涂覆吸湿性聚合物的光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)^[3],基于表面等离子体谐振效应^[4],基于微干涉仪结构^[5-7],以及基于微纳光纤耦合器、微纳光纤圈等传感器设计方案^[8,9]。上述光纤盐度传感方案通常需要单独的流体通道设计。基于空心光纤构建微管腔回音壁谐振模(whispering gallery mode, WGM)传感器可实现高灵敏度折射率测量^[10,11],同时空心光纤具有天然流体通道,非常适合于海水测量应用^[12]。微管腔 WGM 通过倏逝场与分析物的相互作用来实现传感,然而海水吸收损耗会降低 WGM 谐振腔的品质因数,从而影响传感探测极限。

本文基于薄壁微管腔和环腔结构提出了光纤激光盐度传感器。通过制备一对拉锥光纤并与薄

壁微管腔耦合构建敏感单元,该敏感单元与掺铒光纤相接构建形成环形激光谐振腔,实现中心波长与盐度相关的激光输出。与无源的 WGM 透射光谱相比,光纤激光盐度传感器可提供高信噪比的传感信号。理论分析了双拉锥光纤耦合薄壁微管腔结构的盐度传感机制,实验研究了传感器的稳定性、盐度传感灵敏度、盐度测量重复性和探测极限。

2 基本 原 理

光纤激光盐度传感系统结构示意图如图 1 所示。微管腔可以支持 WGM,其谐振波长 λ_m 可以表示为^[12]:

$$\lambda_m = 2\pi n_{\text{eff}} R / m, \quad (1)$$

式中, R 表示微管腔外半径, n_{eff} 表示微管腔壁有效折射率, m 表示 WGM 的角向模式数(为正整数)。微管腔通过两根拉锥光纤和掺铒光纤(Er80-4/125, LIEKKI)构成一个光纤激光环腔,光从拉锥光纤 1 的端口 1 进入,一部分光在耦合区以倏逝场的形式耦合进微管腔,在微管腔周向传播后耦合进入到拉锥光纤 2 的端口 3 出射。掺铒光纤作为增益介质,980 nm 泵浦激光器通过 980/1 550 nm 波分复用器向环腔注入泵浦光,光隔离器确保环形谐振腔内光单向传播,偏振控制器可以调节环形谐振腔内光偏振态,5:95 光耦合器抽取 5% 激光输出,其余 95% 注回环形谐振腔。

薄壁微管腔中溶液的折射率 n_{core} 和盐度 S_A 之间的关系可以表示为^[13]:

$$n_{\text{core}} = A(\lambda, T) S_A + B(\lambda, T), \quad (2)$$

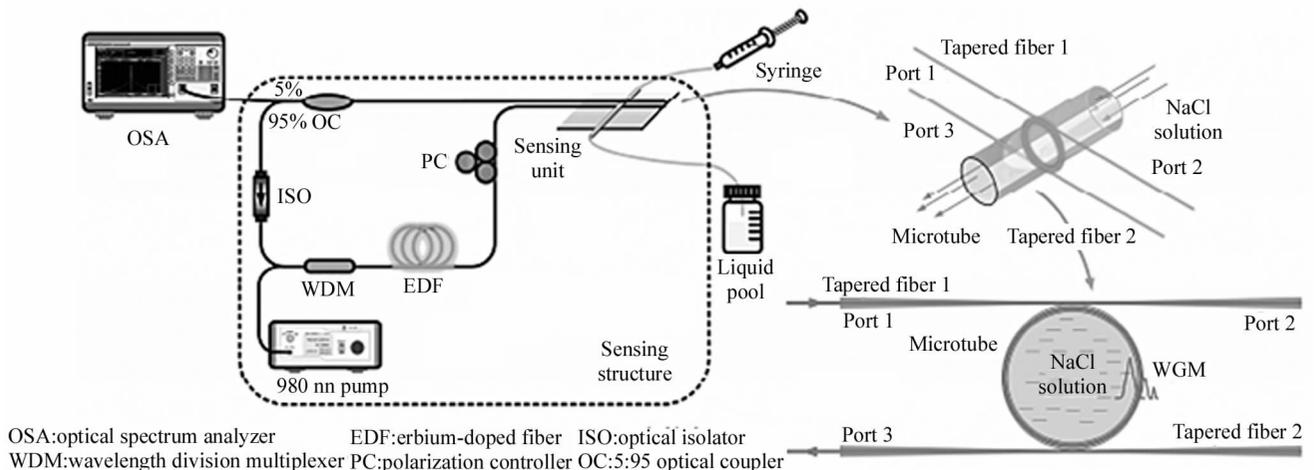


图 1 光纤激光盐度传感系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber laser salinity sensing system

$$\begin{cases} A(\lambda, T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \frac{a_3}{\lambda} \\ B(\lambda, T) = b_0 + b_1 T^2 + \frac{b_2 T}{\lambda} + \frac{b_3}{\lambda} + \frac{b_4}{\lambda^2} + \frac{b_5}{\lambda^3} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, T 表示薄壁微管腔中溶液温度, λ 表示探测波长, $a_i (i=0, 1, 2, 3)$ 和 $b_j (j=0, \dots, 5)$ 为拟合系数。

在 400 nm—1 600 nm 波长范围内, 海水折射率变化趋势平缓^[14], 将式(2)和式(3)推广到 1 557 nm, 当 T 为海水实用盐度的定义温度 15 °C 时^[15], 探测波长漂移 2 nm, 引起 $A(\lambda, T)$ 和 $B(\lambda, T)$ 的变化量很小, 分别为 -8×10^{-9} 和 -8.12×10^{-6} , 因此 $A(\lambda, T)$ 和 $B(\lambda, T)$ 可以近似为常数, 则有效折射率的变化率可以表示为:

$$\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial S_A} = A(\lambda, T) \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{core}}}. \quad (4)$$

通过式(1)和式(4)得到盐度传感灵敏度 S 为:

$$S = \frac{\delta \lambda}{\delta S_A} = A(\lambda, T) \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{core}}}, \quad (5)$$

由式(5)可得当盐度增加时, 谐振波长向长波长移动, 谐振峰发生红移, 盐度引起的谐振波长漂移量和系数 $A(\lambda, T)$ 有关, 当 $T=15$ °C, $\lambda=1557$ nm, 由式(3)可得 $A(\lambda, T)=2.236 \times 10^{-4}$, 根据式(2)和式(3)可得盐度范围为 0‰—45‰ 的海水的折射率范围为 1.3222—1.3323, 实验室制作得到的薄壁微管腔的外直径为 76.5 μm , 壁厚为 1.9 μm , 利用以上参数可以计算得到在 0‰—45‰ 盐度范围内, 有 14.4%—15.8% 的光场能量分布在薄壁微管腔内^[11], 最终通过式(5)计算得到盐度传感灵敏度范围为 38.0 pm/‰—41.3 pm/‰。实际海水温度实时变

化, 根据式(5)可知, 其他温度值对应的盐度传感灵敏度会存在差异。

3 盐度测量实验

3.1 实验系统搭建

按照图 1 搭建实验装置。薄壁微管和拉锥光纤通过氢氧焰熔融拉锥法制备^[10], 两根拉锥光纤锥腰直径为 1.5 μm , 薄壁微管外直径为 76.5 μm , 壁厚为 1.9 μm , 拉锥光纤对与薄壁微管耦合结构固定在 171 mm×57 mm×1 mm 尺寸的石英片上, 如图 2 所示。微管腔一端通过毛细硅胶软管与 1 mL 注射器连接, 另一端通过毛细硅胶软管与 5 mL 废液池相接。传感器中掺铒光纤长度为 0.5 m, 使用光谱分析仪 (AQ6370, YOKOGAWA) 测量输出激光光谱。实验均在常压下进行, 过程中薄壁微管被放置在电控恒温平台上, 保持温度恒定在 15 °C。在薄壁微管腔中注入去离子水前后, 拉锥光纤端口 2 和端口 3 的透射光谱如图 3 所示。去离子水增加了薄壁微管腔的吸收损耗, 导致端口 2 光谱半高全宽由 0.21 nm 展宽为 0.42 nm, 品质因数由 7.34×10^3 下降为 3.67×10^3 , 端口 3 光谱半高全宽由 0.28 nm 展宽为 0.31 nm, 品质因数由 5.51×10^3 下降为 4.98×10^3 。此外, 去离子水改变了薄壁微管腔壁的 n_{eff} , 使拉锥光纤与薄壁微管腔之间的相位匹配条件发生变化, 进而导致相邻径向模式的增强, 端口 3 光谱的边模抑制比 (side-mode suppression ratio, SMSR) 由 12 dB 降低至 10 dB。

在薄壁微管腔中注入去离子水后, 开启 980 nm 泵浦光源, 设置泵浦功率为 150 mW, 使用

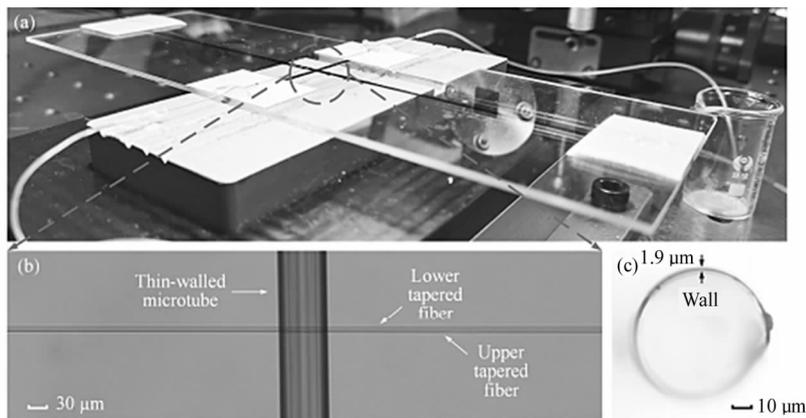


图 2 拉锥光纤对与薄壁微管腔耦合结构实物图和显微图像:(a) 耦合结构实物图;
(b) 耦合结构显微图像;(c) 薄壁微管腔截面显微图像

Fig. 2 Photo and microscopic image of the coupling structure with two tapered fibers and thin-walled microtube cavity:

(a) Photo of the coupling structure; (b) Microscopic image of the coupling structure;

(c) Microscopic image of the thin-walled microtube cavity section

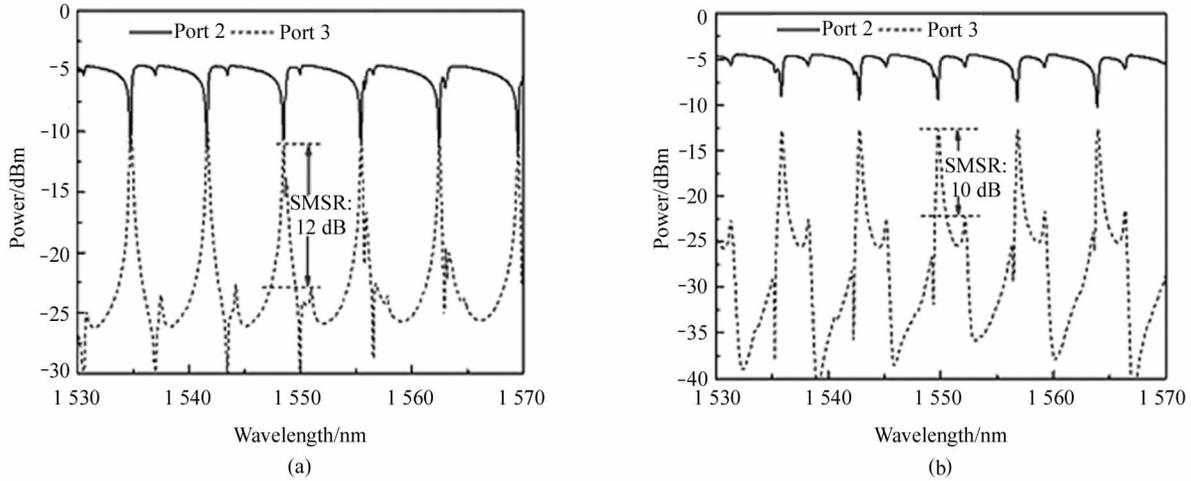


图3 拉锥光纤端口2和端口3的透射光谱:(a) 没有去离子水注入;(b) 去离子水注入

Fig. 3 Transmission spectra of port 2 and port 3 of the tapered fibers;

(a) Without deionized water injection; (b) With deionized water injection

光谱分析仪记录传统系统输出激光光谱和拉锥光纤端口3透射光谱如图4所示。光信噪比和光谱半高全宽是决定传感器最小探测极限的重要因素^[16],谐振激光的光信噪比(optical signal-to-noise ratio, OSNR)为65.226 dB,半高全宽(full width at half maximum, FWHM)为0.0157 nm,与单独的微管腔结构端口3光谱相比,光信噪比提升了41.721 dB,半高全宽压缩了19.75倍。

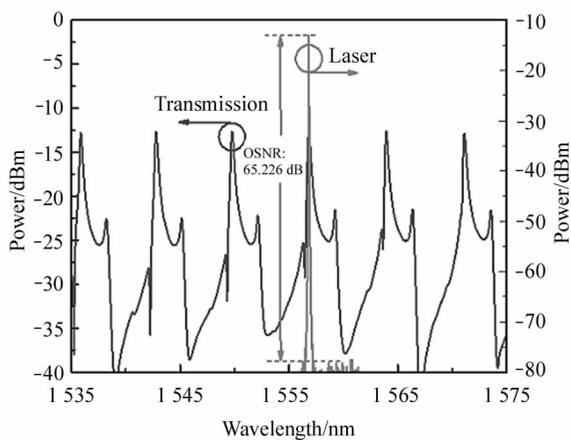


图4 传感系统输出激光光谱和拉锥光纤端口3透射光谱

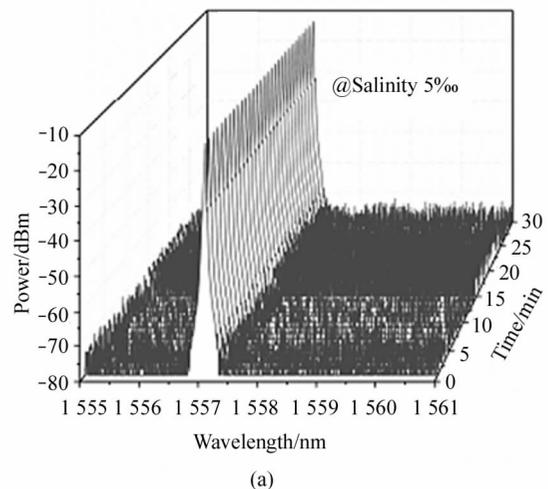
Fig. 4 Output laser spectrum of the sensing system and transmission spectrum of port 3 of the tapered fibers

3.2 盐度传感稳定性

使用NaCl晶体和去离子水配置NaCl溶液,模拟绝对盐度为0‰—45‰的海水。配置的NaCl溶液密封保存在试剂瓶内,每次抽取和注入不同盐度

NaCl溶液时更换注射器,使用注射泵控制注入溶液量为0.2 mL,3倍于流体通道体积,保证上一次的溶液被完全排出。

传感器环形腔全长约为2.5 m,工作仪器放置在独立平台上,可以减小腔长抖动引入的不稳定性。分别在薄壁微管腔中注入绝对盐度为5‰和45‰的NaCl溶液,每间隔1 min采集一次输出激光光谱,共采集30 min。光纤激光盐度传感系统稳定性实验结果如图5所示,在两种盐度下,输出激光峰值波长30 min内均没有发生明显漂移。如图5(c)所示,绝对盐度为5‰时激光器输出波长均值为1557.0426 nm,波长波动标准差为 9.0×10^{-3} nm,绝对盐度为45‰时激光器输出波长均值为1558.4947 nm,波长波动标准差为 5.2×10^{-3} nm,传感器表现出良好的输出激光波长稳定性。



(a)

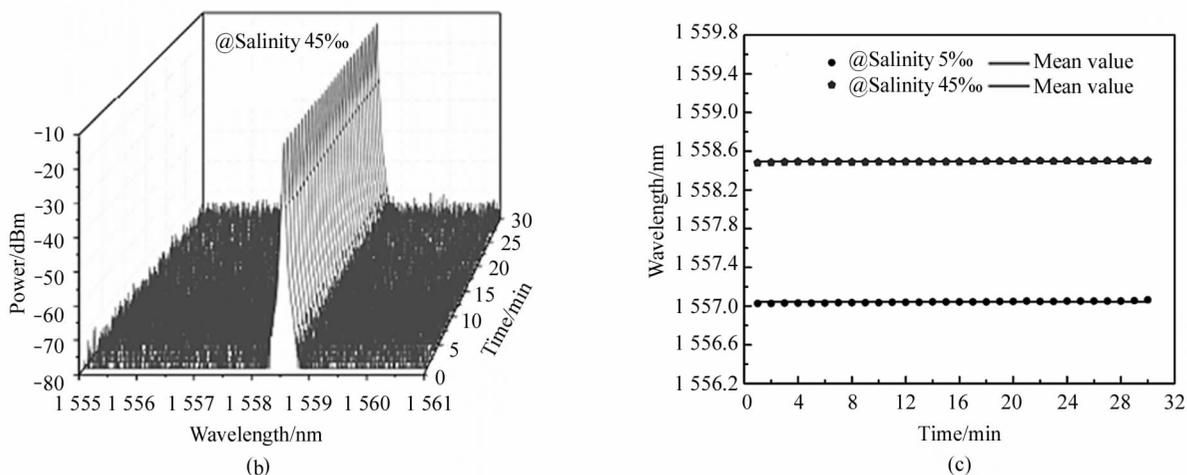


图 5 光纤激光盐度传感系统稳定性实验结果:(a) 绝对盐度 5‰时 30 min 内激光光谱变化;(b) 绝对盐度 45‰时 30 min 内激光光谱变化;(c) 激光光谱峰值波长随时间的变化情况

Fig. 5 Results of stability experiment of fiber laser salinity sensing system: (a) Laser spectrum changes within 30 minutes at absolute salinity 5‰; (b) Laser spectrum changes within 30 minutes at absolute salinity 45‰; (c) Variation of laser spectrum peak wavelengths with time

3.3 盐度传感灵敏度

将不同盐度 NaCl 溶液按照盐度递增顺序依次注入薄壁微管腔中,在每个盐度值下,待输出激光光谱稳定后采集 20 次光谱,采集间隔为 0.5 min。不同盐度下,光纤激光盐度传感系统盐度传感实验结

果如图 6(a)所示,和理论预期相同,输出激光峰值波长随盐度增加向长波长移动。激光峰值波长均值随盐度增加的变化情况如图 6(b)所示,可以看出传感系统输出激光峰值波长均值与盐度具有很好的线性度($R^2 = 0.99924$),盐度传感灵敏度为 $36.5 \text{ pm}/\text{‰}$,

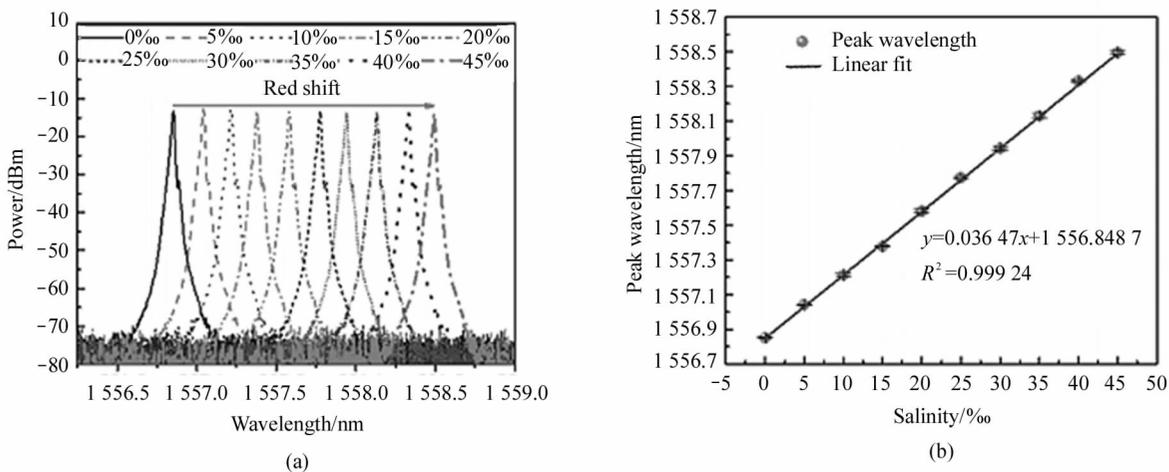


图 6 光纤激光盐度传感系统盐度传感实验结果:(a) 不同盐度对应的激光光谱;(b) 激光峰值波长均值随盐度增加的变化情况

Fig. 6 Results of salinity sensing experiment of fiber laser salinity sensing system: (a) Laser spectra corresponding to different salinities; (b) Variation of mean value of laser peak wavelengths with salinity increasing

与理论灵敏度相符。

3.4 盐度测量重复性

首先将不同盐度的 NaCl 溶液按盐度上升的顺

序依次注入薄壁微管腔中,到达最大盐度后,再按盐度下降的顺序依次注入薄壁微管腔中,同盐度传感实验,各盐度值下对激光峰值波长记录 20 次取平

均。盐度循环实验共进行了3次,光纤激光盐度传感器系统重复性实验结果如图7所示。

由图7(a)和(c)可见,在0‰—45‰盐度测量范围内,3次盐度上升过程和3次盐度下降过程测量结果重合性很好。由图7(b)和(d)可见,3次盐度上升

实验的测量误差分别为±0.6016‰、±0.5384‰和±0.5844‰,标准差范围为0.2008‰、0.1750‰和0.1363‰,3次盐度下降实验的测量误差分别为±0.4796‰、±0.7513‰和±0.6791‰,标准差范围为0.2005‰、0.1975‰和0.1905‰,传感器表现出

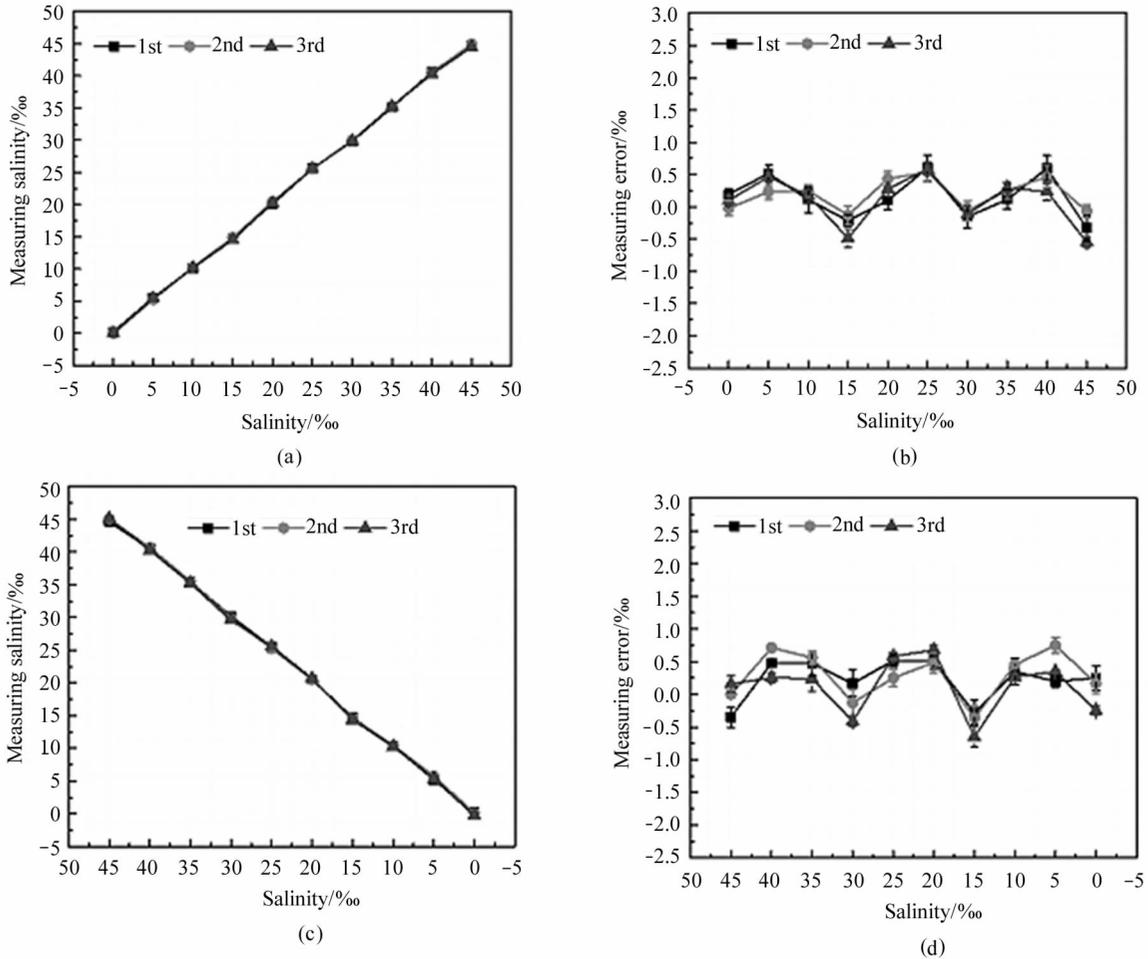


图7 光纤激光盐度传感系统重复性实验结果:(a) 3次盐度上升测量曲线;(b) 3次盐度上升测量误差;(c)3次盐度下降测量曲线;(d) 3次盐度下降测量误差

Fig.7 Results of repeatability experiment of fiber laser salinity sensing system:

- (a) Measured salinity for three tests with salinity increasing;
- (b) Measuring error for three tests with salinity increasing;
- (c) Measured salinity for three tests with salinity decreasing;
- (d) Measuring error for three tests with salinity decreasing

良好的重复性。

3.5 盐度探测极限

对于光纤盐度传感器,探测极限 L_D (detection limit,DL)表示能够被精确测量的最小盐度改变量,可以利用下式计算^[16]:

$$L_D = \frac{R}{S} = \frac{3 \sqrt{\sigma_{\text{ampl-noise}}^2 + \sigma_{\text{temp-induced}}^2 + \sigma_{\text{spect-res}}^2}}{S}, \quad (6)$$

式中, R 表示传感系统分辨率,由振幅噪声标准差 $\sigma_{\text{ampl-noise}}^2$,温度噪声标准差 $\sigma_{\text{temp-induced}}^2$ 和谱量化标准差 $\sigma_{\text{spect-res}}^2$ 等决定,其中振幅噪声标准差 $\sigma_{\text{ampl-noise}}^2$ 与传感光谱的半高全宽和光信噪比有关,谱量化标准差 $\sigma_{\text{spect-res}}^2$ 与传感系统的谱分辨率有关,温度噪声标准差 $\sigma_{\text{temp-induced}}^2$ 与前两项相比一般很小而可以忽略^[16]。根据实验结果,本文提出的基于薄壁微管腔的光纤激

光盐度传感器的盐度传感灵敏度、激光光谱的半高全宽和光信噪比分别为 $36.5 \text{ pm}/\text{‰}$, 0.0157 nm 和 65.226 dB , 光谱仪的谱分辨率为 0.02 nm , 利用式(6)计算得到最小探测极限为 0.4858‰ 。提出的光纤激光盐度传感器和典型的光谱跟踪解调光纤盐度传感器的参数比较如表1所示。

表中探测极限是根据对应参考文献中给出的参数利用式(6)计算得到的。与涂覆吸湿性聚合物的光纤光栅盐度传感器相比,微管腔 WGM 具有更高

的盐度传感灵敏度。由于环腔激光具有高信噪比和窄半高全宽,提出的光纤激光盐度传感器的最小探测极限优于特种光纤错位熔接的微干涉仪结构光纤盐度传感器。基于微纳光纤圈的光纤盐度传感器虽然具有更高的传感灵敏度和更低的探测极限,但是动态范围只有 1‰ ,与之相比提出的光纤激光盐度传感器动态范围为 45‰ 。此外,与上述光纤盐度传感结构相比,薄壁微管腔具有天然的流体通道,无需额外的流体测量通道封装结构。

表1 提出的光纤激光盐度传感器和典型的光谱跟踪解调光纤盐度传感器的参数比较

Tab.1 Comparison of parameters between the proposed fiber laser salinity sensor and typical wavelength-interrogated fiber salinity sensors

Sensing configuration	<i>FWHM</i> /nm	<i>OSNR</i> /dB	Sensitivity/(nm/‰)	Detection limit/‰	Detection range/‰	Fluid channel
Hygroscopic polymer coated FBG ^[3]	0.060	88.00	0.0026	8.3432	0—40	×
Microstructured fiber assisted MZI ^[6]	35.000	7.36	2.2900	6.1862	0—40	×
Microfiber assisted MZI ^[7]	12.500	17.52	2.4190	1.6838	0—30	×
Microfiber coil resonator ^[9]	0.186	4.79	1.5587	0.0549	34.6—35.6	×
Our work	0.016	65.23	0.0365	0.4855	0—45	✓

4 结 论

本文提出了面向海洋应用的基于薄壁微管腔的光纤激光盐度传感器。通过制备一对拉锥光纤耦合的薄壁微管腔,激发回音壁谐振模式,测量微管流体通道内的液体盐度。将拉锥光纤对耦合的薄壁微管腔与掺铒光纤相接,构建形成闭合的环形激光谐振腔,实现中心波长与盐度相关的激光输出。高信噪比的激光传感信号可以实现低探测极限的盐度测量。实验结果表明,该传感器的传感灵敏度为 $36.5 \text{ pm}/\text{‰}$,最小探测极限为 0.4855‰ ,探测范围为 0‰ — 45‰ ,具有良好的盐度传感稳定性和重复性。提出的光纤激光盐度传感器同时具有宽探测范围和低探测极限,无需额外的流体测量通道封装结构,具备一定的海洋盐度探测潜力。

参考文献:

[1] ZHAO Y, LIAO Y, ZHANG B, et al. Monitoring technology of salinity in water with optical fiber sensor[J]. Journal of

Lightwave Technology, 2003, 21(5):1334-1338.

[2] MCDOUGALL T J, JACKETT D R, MILLERO F J. An algorithm for estimating absolute salinity in the global ocean [J]. Ocean Science Discussions, 2009, 6(1):215-242.

[3] UMA K C R, SAMIAPPAN D, KUMAR R, et al. Development of a highly accurate and fast responsive salinity sensor based on Nuttall apodized fiber Bragg grating coated with hygroscopic polymer for ocean observation[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53:102036.

[4] 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.

[5] LIN Z T, LV R Q, ZHAO Y, et al. High-sensitivity salinity measurement sensor based on no-core fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 305:111947.

[6] WANG L, XU Y, GENG Y F, et al. High-sensitivity fiber salinity sensor based on an exposed-core microstructured fiber interferometer[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(49):495402.

[7] XIE N J, ZHANG H, LIU B, et al. In-line microfiber-assisted

- Mach-Zehnder interferometer for microfluidic highly sensitive measurement of salinity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(21):8767-8772.
- [8] YU Y, BIAN Q, LU Y, et al. High sensitivity all optical fiber conductivity-temperature-depth (CTD) sensing based on an optical microfiber coupler (OMC)[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2019, 37(11):2739-2747.
- [9] YIN Y, LI S, REN J, et al. High-sensitivity salinity sensor based on optical microfiber coil resonator[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26):34633-34640.
- [10] YU Z, WANG S, JIANG J F, et al. Investigation of fused tapering with inner pressurized air for microcapillary-based optical sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 45:244-249.
- [11] JIANG J F, ZHANG J, LIU T G, et al. Effect of radial modes of whispering gallery mode in microtube[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12):1228003.
江俊峰, 张晶, 刘铁根, 等. 微管回音壁谐振模径向模式的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(12):1228003.
- [12] GU G F, JIANG J F, WANG S, et al. Highly sensitive temperature sensor based on hollow microsphere for ocean application[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6):6803508.
- [13] QUAN X H, FRY E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18):3477-3480.
- [14] HALE G M, QUERRY M R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3):555-563.
- [15] COX R A, CULKIN F, RILEY J P. The electrical conductivity/chlorinity relationship in natural sea water[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1967, 14(2):203-220.
- [16] WHITE I M, FAN X. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2):1020-1028.

作者简介:

江俊峰 (1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感, 光电检测, 光纤偏振技术等方面的研究.