

文章编号 1004-924X(2024)09-1283-10

温度不敏感的光纤双腔盐度传感器

李依潼^{1,4}, 杨玉强^{1,2,4*}, 牟小光^{3*}, 王 骥^{1,4}, 高佳乐^{1,2}

(1. 广东海洋大学 广东省南海海洋牧场智能装备重点实验室, 广东 湛江 524088;

2. 广东海洋大学 深圳研究院, 广东 深圳 518120;

3. 广东海洋大学 机械工程学院, 广东 湛江 524088;

4. 广东海洋大学 智慧海洋传感网及其装备工程技术研究中心, 广东 湛江 524088)

摘要:针对光纤微腔盐度传感器的温度交叉敏感问题,设计了一种基于陶瓷插芯和氧化锆套筒相结合的开放式盐水腔,利用氧化锆的正热膨胀系数抵消盐水的负热光系数,补偿温度对盐度测量的影响。为进一步提高盐度检测灵敏度,将开放盐水腔和封闭空气腔并联,通过精确控制两腔的自由光谱范围,使干涉谱产生游标效应,利用游标现象实现盐度灵敏度放大。实验结果表明:盐水腔的温度灵敏度仅为 $0.025 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,远低于盐水热光系数导致的温度灵敏度 ($-0.35 \text{ nm}/^\circ\text{C}$);在 $0\sim 3\%$ 的盐度内,并联双腔的盐度灵敏度达到了 $0.1808 \text{ nm}/\%$,比单个盐水腔的盐度灵敏度提高了 10.5 倍。该传感器具有易于制造、灵敏度高、性能稳定等优点,理论上可实现温度的完全补偿。

关键词: 法布里-珀罗干涉仪; 光纤传感器; 盐度; 温度补偿

中图分类号: O436; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1283

Temperature insensitive optical fiber dual-cavity salinity sensor

LI Yitong^{1,4}, YANG Yuqiang^{1,2,4*}, MU Xiaoguang^{3*}, WANG Ji^{1,4}, GAO Jiale^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Equipment for South China Sea Marine Ranching, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Shenzhen Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China;

3. College of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

4. Research Center of Guangdong Smart Oceans Sensor Networks and Equipment Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, 524088 China)

* Corresponding author, E-mail: yuqiangy110@sina.com; xd_gdou@sina.com

Abstract: Addressing the issue of temperature cross-sensitivity in fiber optic microcavity salinity sensors, a novel design featuring an open saltwater cavity constructed from a ceramic ferrule and zirconia sleeve has been developed. The positive thermal expansion coefficient of zirconia effectively counteracts the negative thermal and optical coefficients of seawater, thereby compensating for temperature fluctuations in salinity

收稿日期: 2024-01-24; 修订日期: 2024-02-20.

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (No. 2023A1515011212, No. 2022A1515011603); 深圳市基础研究面上项目 (No. JCYJ20210324122813036, No. JCYJ20220530162200001); 广东省普通高校重点领域专项 (No. 2021ZDZX1015); 广东海洋大学科研启动经费资助项目 (No. 060302112009); 广东海洋大学研究生教育创新计划资助项目 (No. 202328)

measurements. To enhance salinity detection sensitivity, the open saltwater cavity is paired in parallel with a closed air cavity. This configuration precisely controls the free spectral range of both cavities, inducing a vernier effect that significantly boosts salinity sensitivity through this phenomenon. Experimental data indicate that the temperature sensitivity of the newly designed saltwater cavity is just $0.025 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, substantially lower than the $-0.35 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ sensitivity due to seawater's thermal and optical properties. Furthermore, within a salinity range of 0 to 3‰, the sensitivity of the dual cavity system reaches $0.1808 \text{ nm}/\text{‰}$, which is 10.5 times greater than that of a single saltwater cavity. The sensor offers benefits such as ease of manufacturing, high sensitivity, and robust stability. Complete temperature compensation is theoretically achievable with this setup.

Key words: Fabry-Perot interferometer; optical fiber sensor; salinity; temperature compensation

1 引言

盐度是海水的重要参数之一,其精确测量对于海洋生化分析、渔业生产和海洋环境监测具有重要意义^[1-4]。目前,盐度传感器仍然以传统的电学传感器为主,通过测量海水的电导率或电阻率来确定其盐度^[5-6]。然而,电学盐度传感器存在体积较大、易受电磁干扰和海水腐蚀且需要定期校准和维护的缺点^[7-8]。与传统的电学盐度传感器相比,光纤盐度传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、结构紧凑、灵敏度高等优点,受到了研究人员的广泛关注^[9-11]。

近年来,多种不同类型的光纤盐度传感器被提出。2019年,Kumari等将聚酰亚胺涂覆在光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)上,研究了FBG盐度传感器的性能,实验结果表明,FBG的盐度灵敏度仅为 $0.0026 \text{ nm}/\text{‰}$ ^[12]。2020年,Mollaha研究组将海水注入光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)的气孔内,提出了一种基于Sagnac干涉计的光纤盐度传感器,获得了高达 $0.75 \text{ nm}/\text{‰}$ 的盐度灵敏度^[13]。然而,将海水注入PCF非常困难,因此,该传感器的实用性较差。2022年,Zhang等提出一种锥形光纤表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感器,其盐度灵敏度为 $0.68 \text{ nm}/\text{‰}$,但由于SPR所用的金属膜易受海水腐蚀,因此,该传感器不能在水下长时间工作^[14]。2022年,Li等提出了一种基于法布里-珀罗干涉计(Fabry-Perot Interferometer, FPI)的全光纤盐度传感器^[15],其盐度灵敏度达到了 $2.51 \text{ nm}/\text{‰}$ 。该传感器不仅灵敏度高,而且体积小、结构紧凑且耐海水腐蚀,

表现出优异的盐度传感器性能。

以上光纤盐度传感器均通过直接测量海水折射率间接获得海水盐度,而海水折射率随温度的变化非常明显,即光纤盐度传感器对温度交叉敏感^[16-19]。因此,盐度精确测量必须解决温度干扰问题。2008年,Men等采用双光纤光栅级联的方式,实现了海水温度和盐度双参量同步传感^[20]。2019年,Zhao等利用多个SPR不同共振峰灵敏度不同的特点,通过构建灵敏度矩阵实现了温盐深同步测量^[21]。2020年,Akter等提出一种基于光子晶体光纤(PCF)的双芯微结构温盐传感器,获得了 $1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.2 \text{ nm}/\text{‰}$ 的温盐灵敏度^[22]。2020年,Siyu等提出一种基于空芯光纤(HCF)的双通道表面等离子体共振温盐传感器,实现了 $-0.95 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.37 \text{ nm}/\text{‰}$ 的温盐灵敏度^[23]。以上研究表明,实现温度和盐度的同时传感,至少需要两个传感器。

在不增加传感器的基础上,解决温度交叉敏感问题需要对传感器做温度补偿。本文针对光纤FPI盐度传感器,设计了一种基于陶瓷插芯和氧化锆套筒相结合的开放式盐水腔,利用氧化锆的正热膨胀系数来抵消盐水的负热光系数。为了进一步提高盐度检测灵敏度,将开放盐水腔和封闭空气腔并联,通过精准控制两腔的自由光谱范围,使干涉谱产生游标效应,利用游标现象实现盐度灵敏度放大。

2 原理

2.1 盐水腔设计及温度补偿

本文设计的开放式盐水腔结构如图1所示,

该盐水腔由C型氧化铝套筒、陶瓷插芯及两段单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)构成。C型氧化铝套筒固定陶瓷插芯,陶瓷插芯固定SMF,被固定的两SMF端面间缝隙形成开放式盐水腔,盐水由C型氧化铝套筒侧面自由出入。盐水腔的腔长为 L_1 ,两陶瓷插芯间的距离为 D ,陶瓷插芯靠近盐水腔的一端用树脂胶将SMF固定。

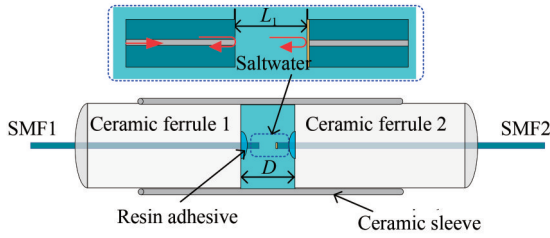


图1 盐水腔结构示意图

Fig. 1 Structure of saltwater cavity

由于盐水的温度系数为负值,而氧化铝的热膨胀系数为正值,因此,当温度升高时,盐水的温度效应会使盐水腔的光程变小,而两陶瓷插芯间氧化铝的热膨胀会增大盐水腔的光程。利用热膨胀系数与温度系数对盐水腔作用相反的特点,通过精确控制两陶瓷插芯间氧化铝的长度可抵消盐水温度效应对盐水腔的影响。

开放式盐水腔的温度灵敏度^[24]可近似表示为:

$$S_T = \lambda_m \left(\frac{1}{L_1} \frac{dL_1}{dT} + \frac{1}{n_1} \frac{dn_1}{dT} \right) \approx \lambda_m \left(\frac{\alpha D}{L_1} + \frac{\beta}{n_1} \right), \quad (1)$$

其中: $\alpha \approx 1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 为氧化铝的热膨胀系数^[25-26], $\beta \approx -3 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 为盐水的温度系数^[27-28], $n_1 \approx 1.333$ 为盐水折射率, λ_m 为盐水腔干涉谱的峰值波长。

当氧化铝的热膨胀与海水的温度效应相互抵消时,盐水腔的温度灵敏度为零,即:

$$\frac{\alpha D}{L_1} + \frac{\beta}{n_1} = 0. \quad (2)$$

式(2)进一步推导可得:

$$\frac{D}{L_1} = -\frac{\beta}{\alpha n_1}. \quad (3)$$

由此可见,精确控制两陶瓷头间距离 D 与腔长 L_1 之比,理论上可实现温度的完全补偿,代入相关参数后,得出 $D/L_1 \approx 22.5$ 。

2.2 并联双腔盐度增敏原理

为提高盐度检测灵敏度,将按上述参数设计的盐水腔和空气腔并联构成传感器,并联双腔结构如图2所示。SMF与一段空芯光纤(Hollow Core Fiber, HCF)熔接,构成空气腔。由于折射率不匹配,传感器内存在4个反射面 M_1, M_2, M_3 和 M_4 ,分别为SMF/Saltwater、Saltwater/SMF、SMF/Air和Air/SMF。 M_1 和 M_2 之间为盐水腔,记为FP₁,腔长为 L_1 ; M_3 和 M_4 之间为空气腔,记为FP₂,腔长为 L_2 。

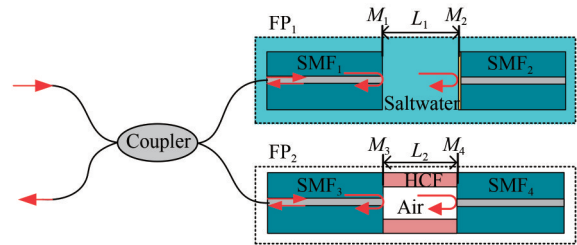


图2 并联双腔结构示意图

Fig. 2 Structure of double parallel cavity

由图2可知,并联双腔的干涉谱为四光束干涉,盐水腔和空气腔的反射光强可分别表示为:

$$I_{\text{saltwater}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi n_1 L_1}{\lambda_m}\right), \quad (4)$$

$$I_{\text{air}} = I_3 + I_4 - 2\sqrt{I_3 I_4} \cos\left(\frac{4\pi n_2 L_2}{\lambda_m}\right), \quad (5)$$

其中: I_1, I_2, I_3 和 I_4 分别为 M_1, M_2, M_3 和 M_4 的反射光强, n_1, n_2 分别为盐水和空气的折射率。并联双腔干涉谱为海水腔和空气腔干涉谱的叠加。当盐水腔的自由光谱范围($FSR_{\text{saltwater}} = \lambda_m^2 / 2n_1 L_1$)与空气腔的自由光谱范围($FSR_{\text{air}} = \lambda_m^2 / 2n_2 L_2$)近似相等时,盐水腔和空气腔之间会产生游标效应,形成干涉谱包络。该干涉谱包络^[29]可表示为:

$$I_{\text{envelope}} = A + 2B \cos\left[\frac{4\pi(n_1 L_1 - n_2 L_2)}{\lambda_m}\right], \quad (6)$$

其中: A 为干涉谱包络的直流成分, B 为干涉谱包络交流振幅。当盐度变化时,盐水折射率改变,盐水腔干涉谱随盐水折射率的变化而移动,并联双腔干涉谱包络随之移动,且包络平移量约为单个盐水腔平移量的 M 倍,即并联双腔产生的游标效应对盐度灵敏度进行了放大。干涉谱包络平

移量^[17]可表示为:

$$\Delta\lambda_{\text{envelope}} = M \cdot \Delta\lambda_{\text{saltwater}}, \quad (7)$$

其中: $\Delta\lambda_{\text{envelope}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{saltwater}}$ 分别为传感器和单个盐水腔包络随盐度变化的位移量; M 为将空气腔作为参考腔,盐水腔作为传感腔时,传感器盐度灵敏度相对于单个盐水腔的游标放大倍率^[29],可表示为:

$$M = \frac{FSR_{\text{air}}}{|FSR_{\text{air}} - FSR_{\text{saltwater}}|}. \quad (8)$$

对并联双腔传感器的盐度特性进行仿真分析,仿真参数分别为: $I_1=0.0015$, $I_2=0.0002$, $I_3=0.0015$, $I_4=0.0004$, $L_1=312.2\text{ }\mu\text{m}$, $L_2=376$

μm , $D=7\,024.5\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha=1.0\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\beta\approx-3\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,盐度为2‰时盐水折射率 $n_1=1.336$,盐度为3‰时盐水折射率 $n_1=1.338$, $n_2=1.0$ 。盐水腔、空气腔的反射谱仿真结果如图3(a)和3(b)所示,单个盐水腔和单个空气腔的自由光谱范围分别为2.88 nm和3.19 nm,双腔并联后呈现明显的包络现象,干涉谱包络的自由光谱范围为31.94 nm。由图3(a)和3(c)可知,当盐度由2‰升高至3‰时,单个盐水腔红移2.28 nm,并联双腔红移23.48 nm,相较于单盐水腔,盐度灵敏度提高了10.3倍。

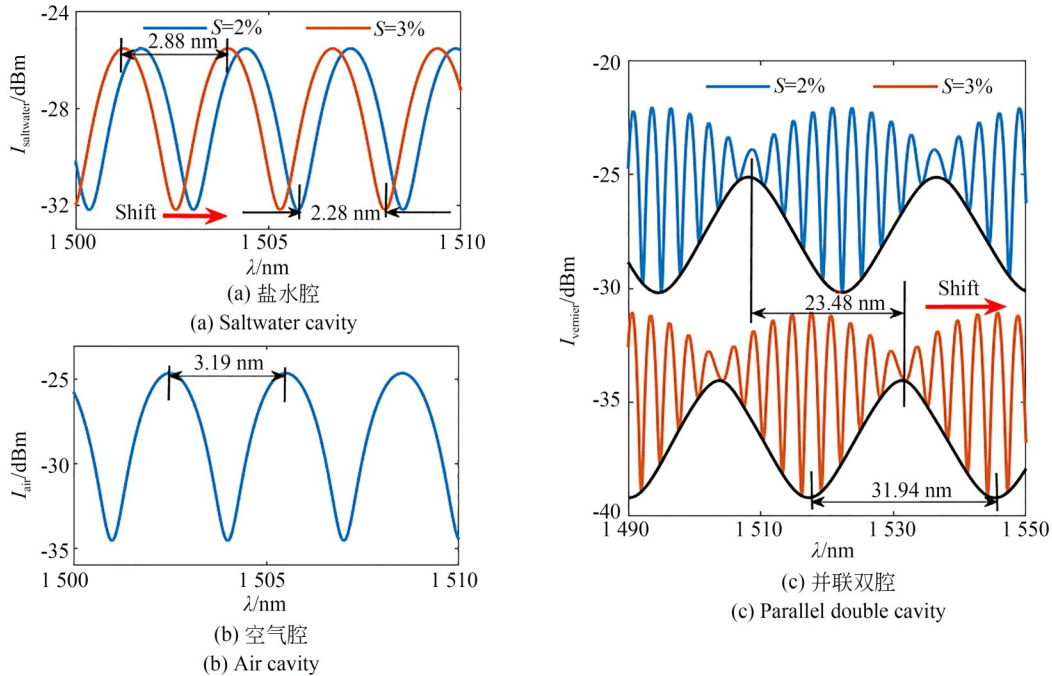


图3 不同盐度下单腔和并联双腔的干涉谱

Fig. 3 Interference spectra of single cavity and parallel double cavity with different salinities

3 实验结果及分析

本文搭建的实验装置如图4所示,该实验装置由宽带光源(BBS)、光谱仪(OSA,型号AQ6370C,分辨率0.02 nm)、耦合器(Coupler)、衰减器(Attenuator)、温控箱(TCC,分辨率0.1℃)和传感器(并联双腔)构成。BBS发出的信号光经耦合器进入并联双腔,并联双腔的反射谱由光谱仪接收。由于空气腔的损耗远小于盐水腔,为使空气腔和盐水腔的反射光强度相当,在空气腔的光路内加入衰减器。

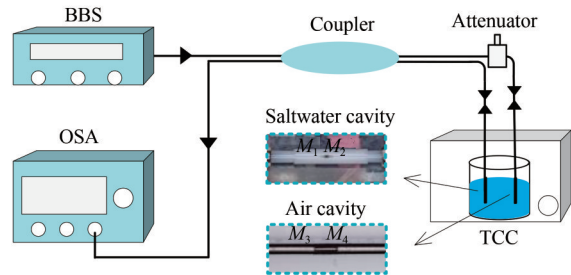


图4 光纤盐度传感实验装置

Fig. 4 Schematic diagram of optical fiber salinity sensing experimental setup

3.1 盐水腔的制备及温度测试

盐水腔的制备过程如下:(1)将一根端面切割平整的单模光纤(SMF,直径约为 $125\text{ }\mu\text{m}$)和另一个端面镀有金膜的SMF相向插入两陶瓷插芯中,然后用氧化锆套筒连接两陶瓷插芯;(2)在显微镜下,按照所设计的 D 与 L_1 之比,精确控制两根SMF间的距离以及两陶瓷插芯端面间的距离,使其分别为 $D=7\text{ }020\text{ }\mu\text{m}$, $L_1=312\text{ }\mu\text{m}$;(3)将环氧树脂AB胶按1:1比例混合搅拌均匀,使它成为乳白色状态;(4)用SMF粘取少量乳白色状态的树脂胶,涂覆在两陶瓷插芯端面,并将其放置在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的温控箱内 1 h ,使树脂胶固化。实验所制备的盐水腔显微图如图5所示。将盐水腔相关参数($D=7\text{ }020\text{ }\mu\text{m}$, $L_1=312\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha\approx 1.0\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\beta\approx -3\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, $n_1\approx 1.333$)代入式(1)计算可得,盐水腔的温度灵敏度 $S_T=0$,即氧化锆的正热膨胀系数完全抵消盐水的负热光系数。

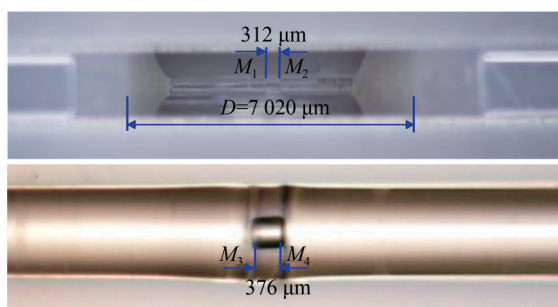
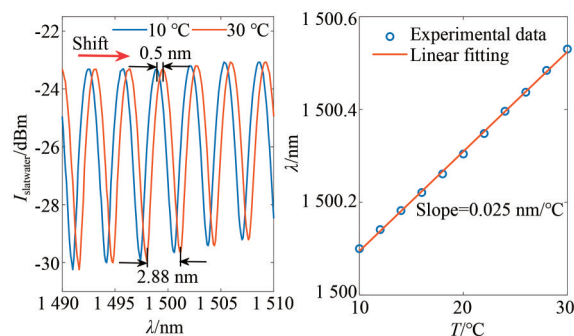


图5 盐水腔和空气腔显微图像

Fig. 5 Microscope image of saltwater cavity and air cavity

为了验证盐水腔的温度补偿效果,将它放入温控箱内进行温度实验。光谱仪记录不同温度下盐水腔的干涉谱及其波长峰值移动情况,结果如图6所示。由图6(a)可知, $1\text{ }500\text{ nm}$ 附近盐水腔的干涉谱自由光谱范围为 2.88 nm ,温度由 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,盐水腔的干涉光谱红移 0.5 nm 。由图6(b)可知,当温度由 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐升高到 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $1\text{ }500\text{ nm}$ 附近盐水腔的干涉谱峰值逐渐红移。拟合结果表明,盐水腔的温度灵敏度约为 $0.025\text{ nm}/^\circ\text{C}$,该灵敏度远低于盐水热光系数导致的温度灵敏度 $-0.35\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由此可见,盐水腔中氧化锆的正热膨胀系数对盐水的负热光系

数具有明显的补偿效果。考虑到补偿前后温度灵敏度由负值变为正值,说明该盐水腔为过度补偿,过度补偿的比例为 7.1% 。过度补偿的原因(实验结果与理论计算结果略有差异的原因)主要是理论计算所用参数与实际参数略有差异造成的。



(a) 温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时盐水腔干涉谱 (b) 盐水腔干涉谱峰值波长随温度变化曲线

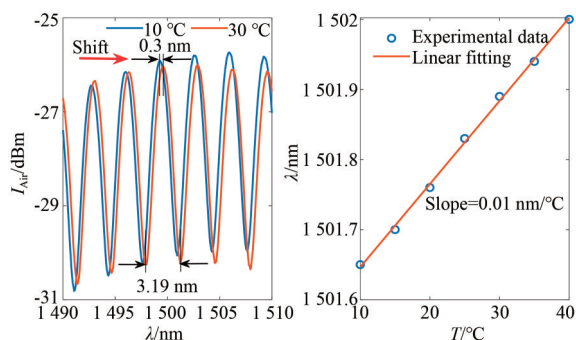
(a) Interference spectrum of saltwater cavity at $10\text{ }^\circ\text{C}$ and $30\text{ }^\circ\text{C}$ (b) Peak wavelength of saltwater cavity interference spectrum with temperature

图6 盐水腔干涉谱及其峰值波长随温度的变化曲线

Fig. 6 Variation of saltwater cavity interference spectrum and peak wavelength with temperature

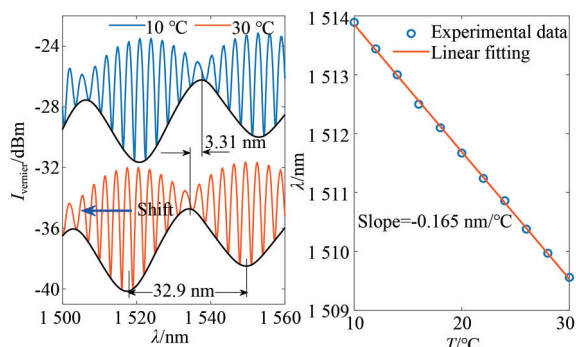
由于温度补偿后盐水腔的温度灵敏度非常小,不能完全忽略温度对空气腔的影响,因此,对空气腔的温度传感特性进行实验研究。空气腔的制备过程如下:将端面切割平整的单模光纤与空芯光纤(HCF,内径约为 $75\text{ }\mu\text{m}$,外径约为 $150\text{ }\mu\text{m}$)对芯熔接,在显微镜下,切割HCF为 $376\text{ }\mu\text{m}$,再将切割好的HCF与另一段SMF对芯熔接,最后将SMF-HCF-SMF固定在玻璃片上,图5(b)为空气腔的显微图。随温度变化的干涉光谱和灵敏度拟合线如图7所示,由图7(a)可知, $1\text{ }500\text{ nm}$ 附近干涉谱的自由光谱范围为 3.19 nm ,温度由 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,空气腔的干涉光谱向长波方向红移 0.3 nm ;图7(b)的拟合结果表明,空气腔 FP_2 的温度灵敏度约为 $0.01\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

将盐水腔 FP_1 与空气腔 FP_2 并联构成传感器,对并联传感器的温度传感特性进行实验研究。图8(a)分别为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时传感器的干涉谱, $1\text{ }530\text{ nm}$ 附近干涉谱包络的自由光谱范围为



(a) 温度为10 °C和30 °C时空气腔干涉谱
(a) Interference spectrum of air cavity at 10 °C and 30 °C
(b) 空气腔干涉谱峰值波长随温度变化曲线
(b) Peak wavelength of air cavity interference spectrum with temperature

图7 空气腔干涉谱及其峰值波长随温度的变化曲线
Fig. 7 Variation of air cavity interference spectrum and peak wavelength with temperature



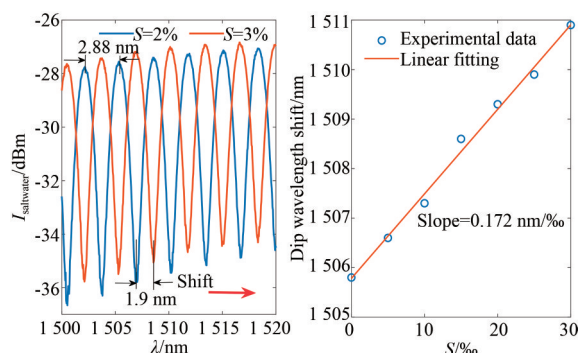
(a) 温度为10 °C和30 °C时传感器干涉谱
(a) Interference spectrum of sensor at 10 °C and 30 °C
(b) 传感器干涉谱峰值波长随温度变化曲线
(b) Peak wavelength of sensor interference spectrum with temperature

图8 传感器干涉谱及其峰值波长随温度的变化曲线
Fig. 8 Variation of sensor interference spectrum and peak wavelength with temperature

32.9 nm, 当温度由10 °C升高至30 °C时, 干涉谱向短波方向蓝移3.31 nm。图8(b)的拟合结果表明传感器的温度灵敏度约为 $-0.165 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

3.2 并联双腔盐度传感实验

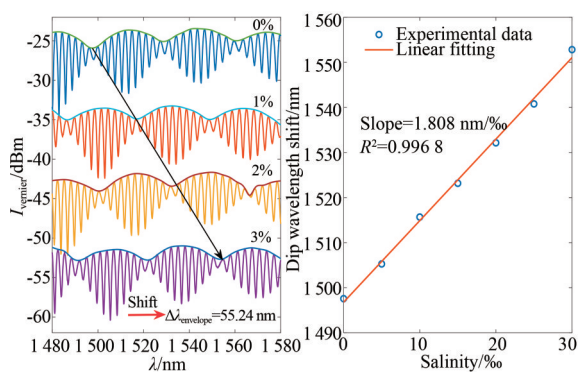
盐度传感实验在室温下进行。传感器头部固定在石英片上, 依次浸没在0~3%浓度的盐水中, 保持头部在不同浓度盐水中浸入的深度相同。图9(a)为盐度变化前后盐水腔FP₁的干涉谱, 由于第二个反射面镀有金膜, 干涉谱获得了大于8 dB的条纹可见度, 当盐水浓度从2%增加



(a) 盐度为20%和30%时盐水腔干涉谱
(a) Interference spectrum of saltwater cavity with 20 % and 30 % salinity
(b) 盐水腔干涉谱峰值波长随盐度的变化曲线
(b) Peak wavelength of saltwater cavity interference spectrum with salinity

图9 盐水腔干涉谱及其峰值波长随盐度的变化曲线
Fig. 9 Variation of saltwater cavity interference spectrum and peak wavelength with salinity

到3%时, 盐水腔的干涉光谱红移1.9 nm。图9(b)表示在0~3%内, 1505 nm附近FP₁干涉谱峰值随盐度的变化曲线, 拟合结果表明, 盐水腔FP₁的盐度灵敏度为 $0.172 \text{ nm}/\%$ 。利用游标效应对传感器干涉光谱包络线进行分析, 得到图10所示的传感器随盐度变化的干涉光谱及灵敏度拟合曲线。由图10(a)可知, 干涉谱上包络线波谷红移55.24 nm; 图10(b)的拟合结合表明, 传感器的盐度灵敏度约为 $1.808 \text{ nm}/\%$ ($6905 \text{ nm}/\text{RIU}$), 线性系数为0.996 8, 实际放大



(a) 盐度为0~30%时传感器干涉谱
(a) Interference spectrum of sensor with 0~30% salinity
(b) 传感器干涉谱峰值波长随盐度变化曲线
(b) Peak wavelength of sensor interference spectrum with salinity

图10 传感器干涉谱及峰值波长随盐度的变化曲线
Fig. 10 Variation of sensor interference spectrum and peak wavelength with salinity

因子约为 10.5,略大于理论游标放大因子 (10.3),这可能由于仿真参数与实验参数的微小差异所致。考虑到光源光谱范围 (1 400~1 600 nm)和实际海水盐度的测量范围,需要观察到明显的游标现象,因此,放大倍数为 7~15 即可满足测量要求。

依次增加和减少盐度,对传感器的重复性进行测试,结果如图 11(a)所示。此外,还对传感器的稳定性进行测试,将传感器浸没在 1%浓度的盐水中,每间隔 1 h 记录一次传感器干涉谱,共记录 10 组数据,10 次干涉谱峰值结果如图 11(b)所示。可以发现,在多次盐度实验中,干涉谱包络峰值均在 1 522.89 nm 附近,所有数据点的标准偏差为 0.106。因此,该传感器具有良好的重复性和稳定性。

表 1 将所提出的传感器与其他光纤盐度传感器进行对比分析。由表 1 可知,相较于其他传感器,本传感器的温度灵敏度最低,同时具有相

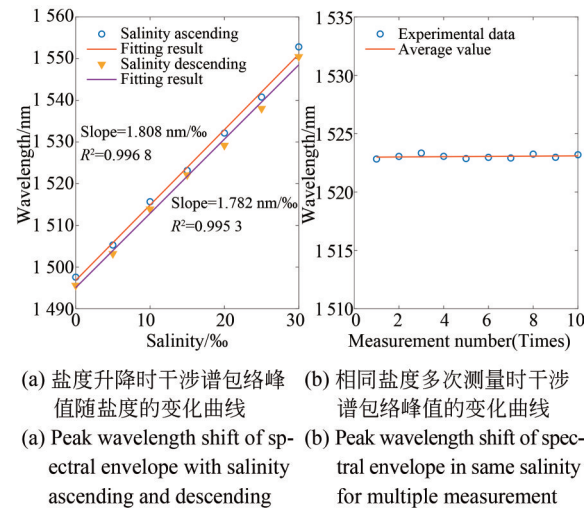


图 11 传感器重复性和稳定性测试结果
Fig. 11 Sensor repeatability and stability test results

对较高的盐度灵敏度。可见,利用氧化锆正热膨胀系数抵消盐水负热光系数的方法是可行的,即在保证制造简单的同时,达到了温度补偿效果。

表 1 光纤盐度传感器温度及盐度灵敏度比较				
Tab. 1 Comparison of temperature sensitivity and salinity sensitivity of fiber optic salinity sensors				
Configuration	Range(%)	Temperature sensitivity(nm/℃)	Salinity sensitivity(nm/‰)	Reference
Nano fiber	0~0.35	1.170	-0.103	[30]
FPI+MZI	0~4	2.176	-2.323	[31]
FPI	0~3.5	6.850	50.000	[32]
OMC	1.466~2.564	2.326	1.596	[33]
NCF+MZI	0.05~0.5	0.798	3.444	[34]
MZI	0.004~0.381	-2.312	0.631	[35]
Dual FPI	0~3	-0.165	1.808	This work

4 结 论

本文设计了一种基于陶瓷插芯和氧化锆套筒相结合的开放式盐水腔,利用氧化锆的正热膨胀系数与盐水负热光系数对盐水腔作用相反的特点,精确控制两陶瓷插芯间氧化锆的长度,来补偿温度对盐度测量的影响。为了进一步提高盐度检测灵敏度,将开放盐水腔和封闭空气腔并联,通过精准控制两腔的自由光谱范

围,使其产生游标效应,利用游标现象实现盐度灵敏度放大。实验结果表明,所设计的盐水腔的温度灵敏度仅为 0.025 nm/℃,远低于海水热光系数导致的温度灵敏度 (-0.35 nm/℃);在 0~3% 的盐度内,并联双腔的盐度灵敏度达到了 1.808 nm/‰,比单个盐水腔的盐度灵敏度提高了 10.5 倍。该传感器具有易于制造、灵敏度高、性能稳定等优点,理论上可实现温度的完全补偿。

参考文献:

- [1] WANG Y, TONG R J, ZHAO K J, *et al.* Optical fiber sensor based on SPR and MZI for seawater salinity and temperature measurement[J]. *Optics Laser Technology*, 2023, 162: 109315.
- [2] 牛慧莉, 王伟, 申佳鑫, 等. 基于空芯光纤的复合双腔光纤法珀盐度传感器[J]. *光学仪器*, 2021, 43(3): 72-77.
NIU H L, WANG W, SHEN J X, *et al.* Composite dual-cavity fiber Fabry-Perot salinity sensor based on hollow core fiber[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(3): 72-77. (in Chinese)
- [3] ALAPPATTU D P, WANG Q, YAMAGUCHI R, *et al.* Warm layer and cool skin corrections for bulk water temperature measurements for air-sea interaction studies [J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 2017, 122(8): 6470-6481.
- [4] ZHU C, HUANG J. Sensitivity-enhanced microwave-photonic optical fiber interferometry based on the Vernier effect [J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16820-16832.
- [5] 王晶, 李国祥, 王姗姗, 等. 三种微纳光纤环形腔海水盐度传感器理论研究[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2015, 45(7): 131-136.
WANG J, LI G X, WANG S S, *et al.* Theory study of three seawater salinity sensors based on microfiber ring resonator[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(7): 131-136. (in Chinese)
- [6] GUZMAN-SEPULVEDA J R, RUIZ-PEREZ V I, TORRES-CISNEROS M, *et al.* Fiber optic sensor for high-sensitivity salinity measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(23): 2323-2326.
- [7] MCDUGALL T J, JACKETT D R, MILLERO F J. An algorithm for estimating absolute salinity in the global ocean [J]. *Ocean Science Discussions (OSD)*, 2009, 6(1): 215.
- [8] 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.
SHEN L, JIANG J F, WANG S, *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)
- [9] WANG L, WANG Y J, SONG S M, *et al.* Overview of fibre optic sensing technology in the field of physical ocean observation[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 745487.
- [10] QIAN Y, ZHAO Y, WU Q L, *et al.* Review of salinity measurement technology based on optical fiber sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 260: 86-105.
- [11] WANG X, WANG J, WANG S S, *et al.* Fiber-optic salinity sensing with a panda-microfiber-based multimode interferometer [J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2017, 35(23): 5086-5091.
- [12] KUMARI C RUMA, 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.
- [13] ASLAM MOLLAH M, YOUSUFALI M, RIFAT BIN ASIF FAYSAL M, *et al.* Highly sensitive photonic crystal fiber salinity sensor based on Sagnac interferometer [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 103022.
- [14] ZHANG S Q, PENG Y, WEI X, *et al.* High-sensitivity biconical optical fiber SPR salinity sensor with a compact size by fiber grinding technique[J]. *Measurement*, 2022, 204: 112156.
- [15] LI Z H, LI L K, ZHANG Y N, *et al.* Highly-sensitive fiber-optic F-P salinity sensor based on vernier effect [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 74: 103148.
- [16] FLORES R, JANEIRO R, VIEGAS J. Optical fibre Fabry-Pérot interferometer based on inline microcavities for salinity and temperature sensing[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9556.
- [17] 赵玉欣, 姜久兴, 杨玉强, 等. 基于游标效应增敏的全光纤液体折射率传感器[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148022.
ZHAO Y X, JIANG J X, YANG Y Q, *et al.* A sensitivity-enhanced all-fiber-optic liquid refractive in-

- dex sensor based on vernier effect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148022. (in Chinese)
- [18] ZHANG X P, PENG W. Temperature-independent fiber salinity sensor based on Fabry-Perot interference [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (8) : 10353-10358.
- [19] LIN Z T, ZHAO Y, LV R Q, *et al.* High-sensitivity salinity sensor based on etched C-type micro-structured fiber sensing structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 339: 113518.
- [20] MEN L Q, LU P, CHEN Q Y. A multiplexed fiber Bragg grating sensor for simultaneous salinity and temperature measurement [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(5): 053107.
- [21] 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.
- [22] AKTER S, AHMED K, EI-NAGGAR SA, *et al.* Highly sensitive refractive index sensor for temperature and salinity measurement of seawater [J]. *Optik*, 2020, 216: 164901.
- [23] SIYU E, ZHANG Y N, HAN B, *et al.* Two-channel surface plasmon resonance sensor for simultaneous measurement of seawater salinity and temperature [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7191-7199.
- [24] 高佳乐, 杨玉强, 牟小光, 等. 基于增强型游标效应的光纤温度传感器[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(24): 3531-3539.
- GAO J L, YANG Y Q, MU X G, *et al.* Fiber-optic temperature sensor based on enhanced Vernier effect [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(24): 3531-3539. (in Chinese)
- [25] 高红春, 江毅, 彭华, 等. 高灵敏度光纤温度传感器[J]. *光学技术*, 2017, 43(5): 431-433.
- GAO H CH, JIANG Y, PENG H, *et al.* An optical fiber temperature sensor with high sensitivity [J]. *Optical Technique*, 2017, 43(5): 431-433. (in Chinese)
- [26] 吉至试剂. 氧化锆的基本性质介绍[EB/OL]. (2022-11-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1749167154036118537&wfr=spider&for=pc>.
- Jizhi Reagent. *Introduction to Basic Properties of Zirconia*[EB/OL]. (2022-11-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1749167154036118537&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese)
- [27] WANG Y, YANG M W, WANG D N, *et al.* Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27 (3): 370.
- [28] 王永光. 基于光纤干涉计的温度传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- WANG Y G. *Research on Temperature Sensor Based on Optic-fiber Interferometer* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [29] PAN R, LIU M X, BIAN Y, *et al.* High-sensitive temperature sensor with parallel PDMS-filled FPIs based on dual Vernier effect [J]. *Optics Communications*, 2022, 518: 128284.
- [30] WANG S S, LIAO Y P, YANG H J, *et al.* Modeling seawater salinity and temperature sensing based on directional coupler assembled by polyimide-coated micro/nanofibers. [J]. *Applied Optics*, 2016, 54(34): 10283-10289.
- [31] 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.
- [32] ZHENG H K, ZHAO Y, LV R Q, *et al.* Reflective optical fiber sensor based on dual fabry perot cavities for simultaneous measurement of salinity and temperature [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(24): 27495-27502.
- [33] YU Y, BIAN Q, LU Y, *et al.* High sensitivity all sensing based on an Optical Microfiber Coupler (OMC) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2739-3747.
- [34] YAN J M, ZHANG A L, CHENG Q H, *et al.*

High sensitivity open-cavity Mach-Zehnder interferometer based on no-core fiber for seawater salinity measurement[J]. *Optik*, 2021, 227: 165954.

[35] LIU J C, HOU Y F, WANG J, *et al.* Multi-pa-

rameter demodulation for temperature, salinity and pressure sensor in seawater based on the semi-encapsulated microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Measurement*, 2022, 196: 111213.

作者简介:



李依潼(1988—),女,吉林辽源人,博士研究生,2010年、2013年于东北电力大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学传感与检测技术的研究。E-mail: liyitongfly@163.com

通讯作者:



杨玉强(1977—),男,山东德州人,博士,教授,博士生导师,2002年于东北师范大学获得学士学位,2004年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光学传感与检测技术的研究。E-mail: yuqiangy110@sina.com