

引用格式: 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):0406001

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):0406001

# 基于拉丝塔光纤光栅的准分布式温盐传感器

王宇琦<sup>1,2</sup>, 潘震<sup>1,2</sup>, 戢雅典<sup>1,2</sup>, 范典<sup>1</sup>, 周次明<sup>1</sup>

(1 武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 武汉 430070)

(2 武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 430070)

**摘 要:**提出了一种基于拉丝塔光纤光栅(DTG)的准分布式温盐传感器,可以同时测量海水的温度和盐度。该传感器由多个聚酰亚胺(PI)涂敷 DTG 和无涂敷 DTG 串联构成,PI 涂敷 DTG 作为盐度传感组件,盐度的变化会导致聚酰亚胺涂层吸收或释放水而产生膨胀或收缩作用,进而引起光纤光栅中心波长的漂移。温度串扰可以通过使用无涂敷光纤光栅中心波长的变化来补偿。实验结果表明,该传感器能实现温度和盐度的实时测量,对温度和盐度的变化表现出线性响应,且具有良好的重复性。其中,盐度灵敏度平均为 $-5.58 \text{ pm}/(\text{mol}/\text{L})$ ,温度灵敏度平均为 $10.02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。由于拉丝塔光纤光栅的超弱反射特性,该方法可以实现大规模海水温度和盐度的准分布式测量,在海洋工程中有一定的应用前景。

**关键词:**盐度测量;温度补偿;拉丝塔光纤光栅;聚酰亚胺;准分布式

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235204.0406001

## 0 引言

海洋占据了地球总面积的约 71%,对海洋资源的开发利用日益受到世界各国的重视。提高海洋认知能力,研究和开发用于海洋观测的传感器技术及检测设备,是建设海洋强国、实现“透明海洋”战略的重要内容。海水温度和盐度是所有海洋学科所必需的最关键、最基本的物理参数,对研究海洋气候变化、监测海洋生态环境、开发利用海洋资源、保障军事安全等都具有重要的理论价值和现实意义<sup>[1-2]</sup>,开发用于海水参数测量的高性能传感器已经成为研究热点之一。

目前,电化学传感器是测量海水参数的主要方式<sup>[3-4]</sup>,它们具有测量精度高和实用性广的特点。这类传感器虽然发展相对成熟,但易受电磁干扰和海水腐蚀,而且海水中其他导电离子也会引起电导率的测量误差<sup>[5-6]</sup>。此外,为了满足大面积海洋温盐数据获取的需求,通常需要复用多个传感器进行组网,这极大地增加了经济成本,性价比较低。

近年来,光纤传感方法为物理参数的高精度测量提供了一种新的解决方案,它具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、实时分布式测量等优点<sup>[7-9]</sup>。目前被广泛研究的光纤温盐传感器主要有干涉型光纤温盐传感器和光纤光栅型温盐传感器。干涉型光纤温盐传感器主要分为马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)温盐传感器,法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)温盐传感器和赛格纳克干涉仪(Segnac Interferometer, SI)温盐传感器。国内外研究学者通过对光纤进行拉锥、反拉锥、侧边抛磨、错位熔接、芯径失配熔接等光纤微加工处理实现了光纤干涉仪的设计,其中 MZI 因其简单的光学结构和优良的性能成为了干涉仪中研究最广泛的一种。2019 年,LIU Tianqi 等<sup>[10]</sup>结合非绝热锥形和两种不同光纤之间的模场失配,提出了一种拼接点锥形光纤 MZI,实现了海水温度和盐度的同时测量。2021 年,ZHENG Hongkun 等<sup>[11]</sup>提出了一种由两个 Fabry-Perot 腔组成的反射式光纤温盐传感器,通过将错位熔接制造的 F-P 腔暴露

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 52071245, 61975157, 62275204),国家重点研究与发展计划(No. 2021YFB3202901)

第一作者:王宇琦, 326864156@qq.com

通讯作者:周次明, zcm@whut.edu.cn

收稿日期:2022-10-22;录用日期:2022-11-28

<http://www.photon.ac.cn>

在环境中直接感测环境盐度,另一个用于补偿温度产生的耦合效应。同年,YANG Chengkun等<sup>[12]</sup>提出了一种基于级联保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber,PMF)锥形的SI,用于同时测量海水盐度和温度。当传感器周围海水盐度发生变化时,PMF锥体渐细区域的相关折射率差也会相应变化,最终导致输出光谱偏移。上述干涉型光纤温盐传感器具有灵敏度高等优点,且取得了一定的研究成果,但普遍存在制作难度大、结构稳定性差等问题<sup>[13]</sup>,难以满足海洋工程的应用需求。

相较而言,光纤光栅型温盐传感器主要是基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)设计的,单个FBG即可构成一个传感器,其制作更简单,结构更稳定,环境适应性更强。但普通的FBG只对温度和应变敏感,对盐度不敏感。为了监测环境中的盐度变化,一些学者将湿敏材料涂覆在光纤光栅表面来实现盐度的测量。常见的湿度敏感材料有聚酰亚胺<sup>[14]</sup>、聚乙烯醇<sup>[15]</sup>和明胶<sup>[16]</sup>等,这些湿敏材料会随着环境湿度的变化产生可逆的体积线性膨胀和收缩。当把涂覆这些湿敏材料的光纤光栅放入海水中,盐度的变化引起湿敏材料吸水膨胀或失水收缩,进而使光纤光栅纵向应力发生变化,最终导致其中心波长发生偏移。因此,可以通过湿敏材料涂敷的光纤光栅反射光中心波长偏移来实现环境中盐度的测量。其中,聚酰亚胺由于具有较强的耐热性和较理想的疏水性而被广泛应用于海水的盐度测量中。2008年,MEN Liqiu等<sup>[17]</sup>通过两个不同涂敷材料的FBG级联来同时测量海水的温度和盐度,但丙烯酸酯涂层具有非线性的湿度敏感性和强烈的温度依赖性<sup>[18]</sup>,导致最终测量的数据准确性不高。2011年,WU Chuang等<sup>[19]</sup>利用聚酰亚胺涂层的保偏光子晶体光纤(Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber,PM-PCF)结合FBG的方法实现了海水温度和盐度的同时测量。2017年,LUO Dong等<sup>[20]</sup>提出了一种基于聚酰亚胺薄膜蚀刻FBG的光纤温盐传感器,但蚀刻后的FBG机械强度较低,导致传感器的稳定性较差,不能长期使用。上述的光纤光栅温盐传感器虽然具有良好的机械强度和盐度敏感性,但目前光纤光栅温盐传感器多采用的是反射率较高的强FBG,只能进行离散点测量,无法实现分布式传感。

基于此,本文提出了一种基于拉丝塔光纤光栅(Drawing Tower Grating,DTG)的准分布式温盐传感器,将PI涂敷DTG和无涂敷DTG集成到单根光纤中以形成温盐度传感元件。计算盐度和温度的数学矩阵,作为该传感器的分析方法,并将其应用于海水的盐度和温度测量。此外,由于拉丝塔光纤光栅反射率极低,可尽量减少高阶串扰,满足大规模复用的需要,具有良好的海洋工程应用前景,可以实现海水温度和盐度的实时、准分布式测量。

## 1 原理分析

为了使DTG对盐度产生响应,本文选择聚酰亚胺作为DTG的涂敷材料。聚酰亚胺是一种较理想的疏水性高分子材料,它具有良好的耐热性和耐水解性。在不同浓度的盐溶液中,聚酰亚胺中的水分子会发生积累或扩散,其体积会发生线性膨胀或收缩<sup>[17]</sup>。当溶液的盐度值不变时,聚酰亚胺与溶液之间的水交换会达到动态平衡,聚酰亚胺中水的浓度最终会趋于一个稳定值。当聚酰亚胺从低盐度溶液中转移到高盐度溶液时,由于聚酰亚胺中水的浓度与周围溶液的浓度不同,水会从聚酰亚胺中扩散到溶液中,这将导致聚酰亚胺的体积收缩。反之,聚酰亚胺则会吸水而导致体积膨胀。

聚酰亚胺在溶液中的水交换是一个扩散过程,符合一维菲克第二定律<sup>[21]</sup>

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c \quad (1)$$

式中, $c$ 是水的浓度, $D$ 是扩散系数, $t$ 是扩散时间。该模型假设涂层厚度是恒定的;涂层和DTG之间的界面是不可渗透的;涂有聚酰亚胺涂层的光纤可以看成是一个圆柱体,水沿圆柱体径向扩散。式(1)柱坐标下表示为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中, $r$ 是辐射半径。在时间为 $t$ 时,溶液中水分扩散到聚酰亚胺涂层中 $r$ 处的边界条件为 $c(a < r < b, t = 0) = C_0$ ;  $c(r = b, t \geq 0) = C_{\text{ext}}$ ;  $\frac{\partial c}{\partial t}(r = a, t \geq 0) = 0$ 。其中, $C_0$ 和 $C_{\text{ext}}$ 分别表示不同径向位置对应的水浓度, $a$ 为不包含涂层厚度的光纤半径, $b$ 为包含涂层厚度的光纤半径。

当光纤没入溶液中时,可视为光纤外溶液的浓度保持稳定不变。此时外界环境中的水会扩散进入光纤涂层中,最终达到一个平衡状态。由式(2)可得到此时涂层中水浓度  $c_{i0}$  为<sup>[17]</sup>

$$c_{i0}(r, t) = C_{\text{ext}} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (3)$$

式中,  $\operatorname{erfc}$  是互补误差函数。此时,若容器里的溶液盐度增加,聚酰亚胺涂覆层中的水浓度将会高于外界溶液。因此水会从涂覆层扩散到外界溶液中,直到形成一个新的平衡状态。此时,涂层中的水浓度  $c_{i1}$  为

$$c_{i1}(r, t) = C_{\text{ext}} \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (4)$$

式中,  $\operatorname{erf}$  是高斯误差函数。因此在溶液浓度改变过程中,聚酰亚胺涂层中的水浓度变化可表示为

$$\Delta c = C_{i1}(r, t) - C_{i0}(r, t) = C_{\text{ext}} \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{4Dt}}\right) - C_{\text{ext}} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (5)$$

当环境温度恒定时,随着外界溶液盐度增加,包覆光栅外侧聚酰亚胺涂层中的水浓度也会发生变化。为了使涂层和外界溶液中水浓度达到平衡,聚酰亚胺涂层中的水分会释放导致其体积收缩,对 DTG 产生径向压力和轴向应变。而 DTG 的径向压力可忽略不计,因此布拉格波长蓝移是由聚酰亚胺收缩产生的负轴向应变造成的<sup>[21]</sup>。

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

式中,  $L$  是光纤的长度,  $\Delta L$  是聚酰亚胺涂层体积变化导致光纤纵向的变化量。故盐度变化引起 DTG 中心波长的偏移为

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \epsilon \quad (7)$$

式中,  $\lambda_B$  是光纤光栅的中心波长,  $\Delta \lambda_B$  是光纤光栅中心波长的偏移量,  $P_e$  是光纤的有效弹光系数。

在实际盐度的测量过程中,环境温度也会发生变化,温度的变化会引起 DTG 材料的热光效应和热膨胀效应产生变化,最终导致 DTG 中心波长的偏移。由于 PI 涂敷 DTG 能够同时感受到盐度和温度的变化,则其引起的  $\lambda_B$  偏移可以表示为<sup>[17]</sup>

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = K_{S, \text{PI}} \cdot \Delta S + K_{T, \text{PI}} \cdot \Delta T \quad (8)$$

式中,  $K_{S, \text{PI}}$  是 PI 涂敷 DTG 的盐度灵敏度,  $K_{T, \text{PI}}$  是 PI 涂敷 DTG 的温度灵敏度,  $\Delta T$  和  $\Delta S$  是分别是环境温度和盐度的变化量。

为了准确地测量外界溶液的盐度,可使用仅对温度敏感的无涂敷 DTG 进行温度补偿。因此,可以使用以下矩阵实现温度补偿

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{S, \text{PI}} \cdot K_{T, \text{DTG}}} \begin{bmatrix} K_{S, \text{PI}} & 0 \\ -K_{T, \text{PI}} & K_{T, \text{DTG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{DTG}} \\ \Delta \lambda_{\text{PI}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $K_{T, \text{DTG}}$  是无涂敷 DTG 的温度灵敏度,  $\Delta \lambda_{\text{DTG}}$  和  $\Delta \lambda_{\text{PI}}$  分别是无涂敷 DTG 和 PI 涂敷 DTG 中心波长的偏移量。

## 2 实验系统与传感器制作

本文制作的准分布式温盐传感器如图 1 所示,该传感器由两根不同涂敷材料的光纤熔接构成,其光纤直径均为 125  $\mu\text{m}$ 。其中,聚酰亚胺涂敷的光纤用来测量海水盐度的变化,PI 涂层的厚度为 12.5  $\mu\text{m}$ ;而丙烯酸脂涂敷的普通光纤用来测量海水的温度并解决 PI 温度串扰,丙烯酸脂涂层的厚度为 62.5  $\mu\text{m}$ 。但实验证明盐度对丙烯酸酯涂层也有影响<sup>[18]</sup>,在盐水中会吸水或者失水。因此,为了得到溶液中准确的温度值,将普通光纤在光栅处的丙烯酸酯涂敷剥除,成为无涂敷 DTG。

该传感器使用的光纤光栅为拉丝塔在线拉制的低反射率光栅<sup>[22]</sup>,图 2 为 PI 涂敷 DTG 和无涂敷 DTG 的输入光功率和反射光功率谱图。

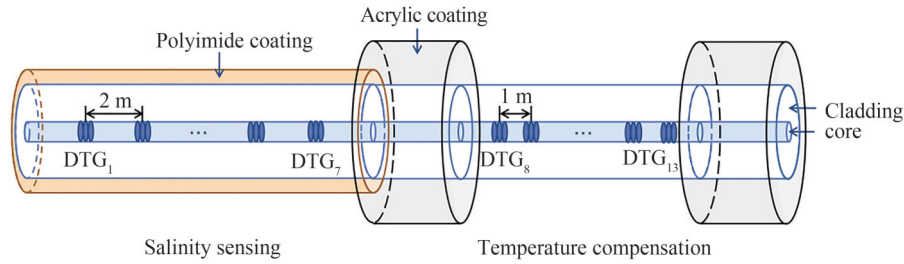


图1 基于拉丝塔光纤光栅的温盐传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature and salt sensor based on GTG

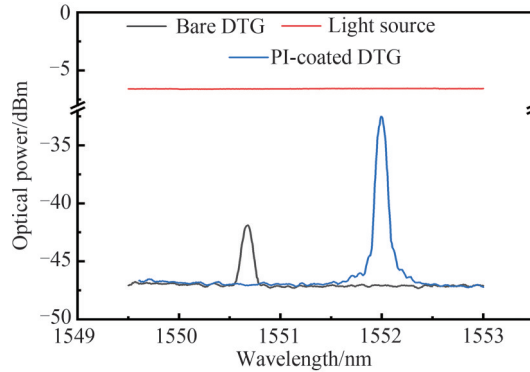


图2 拉丝塔光纤光栅输入光功率谱和反射光功率谱图

Fig. 2 Input optical power spectrum and reflected optical power spectrum of drawing tower fiber grating

本文选择7个PI涂敷DTG用来检测盐度, 栅距为2 m, 6个无涂敷的DTG用于测量海水温度, 栅距为1 m。温度和盐度测量的实验系统如图3所示, 其中左图为温度测量系统, 右图为盐度测量系统。该实验系统主要由光纤光栅温盐传感器、电子温度传感器、光纤光栅阵列解调仪、恒温水箱和计算机组成。在实验过程中, 将传感器卷成直径约为9 cm的小圆圈, 通过光纤光栅阵列解调仪实时解调出光纤光栅的中心波长, 其数据由计算机实时采集和记录。测量中使用的光纤光栅阵列解调仪的型号为FBGDS-3000, 购于武汉烽理光电技术有限公司, 其仪表波段为1 549~1 553 nm, 响应时间为1 s, 空间分辨率为1 m。在测量温度时, 所

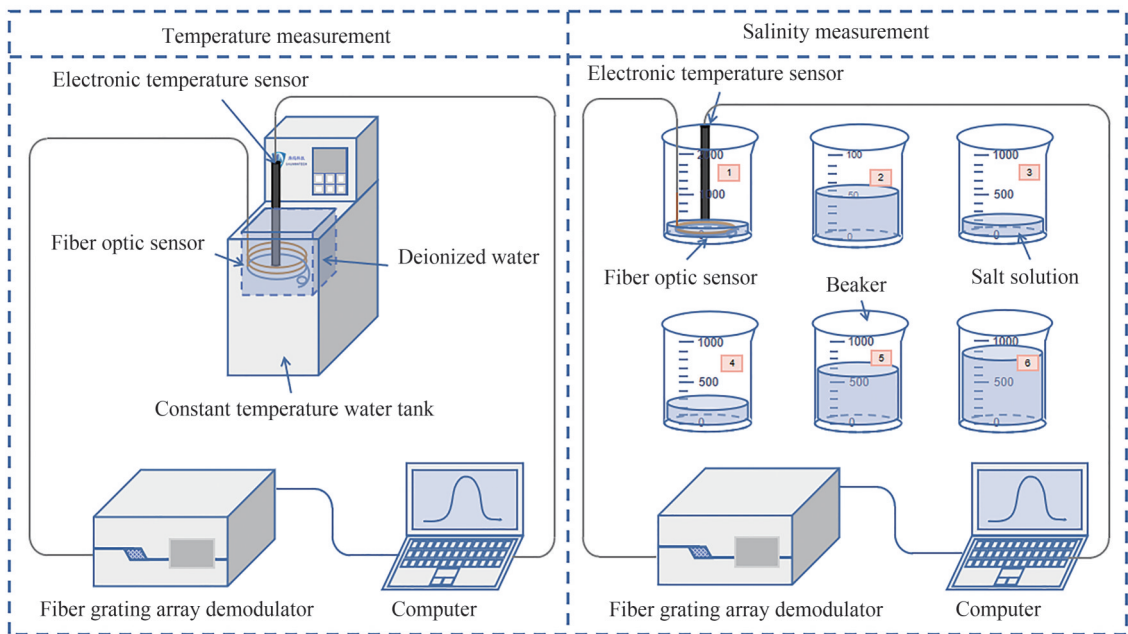


图3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system

使用的恒温水箱的型号为RTS-0515,购于南京舜玛仪器有限公司,其温度测量范围为 $-5\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度波动度为 $\pm 0.005\sim 0.010\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在温度补偿系数测量实验中,把恒温水箱中装满去离子水,将设计的传感器放入从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 再回到 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的循环温度场中,步长为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了模拟传感器实际的工作环境,选择在室温环境中测量盐度的变化。将传感器没入2 L的烧杯中,该烧杯中装有200 ml浓度为5 mol/L的NaCl溶液。另外制备了五组溶液,将这些溶液依次倒入2 L的烧杯中,可将杯中溶液逐渐稀释至4 mol/L,3 mol/L,2 mol/L,1 mol/L,0.6 mol/L。在整个温盐测量过程中,将电子温度传感器放置在光纤传感器附近来测量环境中的实际温度。以电子温度传感器测得的温度值进行标定,并与光纤传感器测得的温度进行对比。本文使用的电子温度传感器为青岛道万科技有限公司的DW1222,其测量范围为 $-2\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测量精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,响应时间为200 ms,可实时在线监测和记录温度数据。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 温度补偿系数测量

将光纤传感器放入装满去离子水的恒温箱中,其温度恒定在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,浸泡30 min使聚酰亚胺充分吸水膨胀后,再开始进行温度实验。改变恒温水箱的设定温度,将温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐升至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再降回 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,步长为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于恒温箱降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要的时间约为升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的2倍,故升温时每梯度测量时间为10 min,降温时每梯度的测量时间为15 min,使其在温度稳定时数据采集的时间基本相同。在温度测量过程中,将电子温度传感器放置在光纤传感器附近,同步记录恒温箱中温度的实际变化。

图4(a)和(c)分别为PI涂敷DTG和无涂敷DTG随温度改变其中心波长偏移量的变化曲线。由图4可知,PI涂敷DTG和无涂敷DTG的中心波长偏移量随着温度升高而增大,随着温度下降而减小,可以实时的

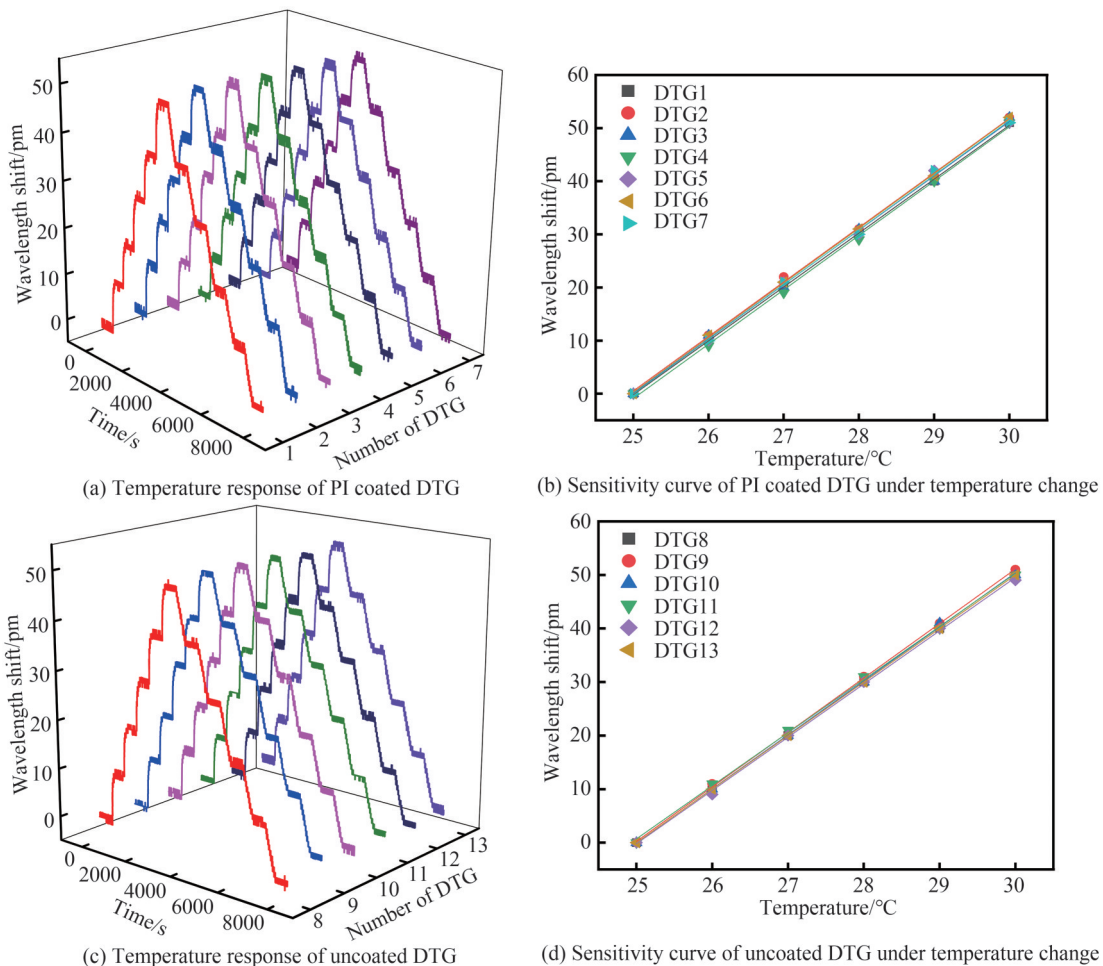


图4 光纤传感器的温度响应

Fig. 4 Temperature response of fiber optic sensor

反映温度的变化。此外,DTG1~DTG13在相同温度场下其中心波长数据时域特性良好,而且随温度变化的整体趋势基本一致,这表明将光纤光栅进行级联并没有影响光栅的性能,可以实现温度的实时、准分布式的测量。

温度在 25 °C~30 °C 的范围内,步长为 1 °C,对监测的温度数据进行线性拟合,其结果分别如图 4(b)和(d)所示,其中图 4(b)为 PI 涂敷 DTG 的线性拟合,图 4(d)为无涂敷 DTG 的线性拟合,斜率表示传感器的温度灵敏度。表 1 和表 2 分别展示了 PI 涂敷 DTG 和无涂敷 DTG 温度响应的拟合结果。由图可知,PI 涂敷 DTG 和无涂敷 DTG 随温度的改变呈线性响应。从拟合结果可知,PI 涂敷 DTG 的平均温度灵敏度约为 10.24 pm/°C,无涂敷 DTG 的平均温度灵敏度约为 10.02 pm/°C。PI 涂敷的 DTG 温度灵敏度略高,是因为除了光纤光栅本身对温度产生响应外,PI 涂层还会随着温度的变化而膨胀和收缩。

表 1 PI 涂敷 DTG 温度响应的线性拟合结果

Table 1 Linear fitting results of PI coated DTG temperature response

Sample	DTG1	DTG2	DTG3	DTG4	DTG5	DTG6	DTG7
$K_{T,PI}$	10.14	10.26	10.23	10.23	10.29	10.29	10.29
$R^2$	0.999 67	0.998 86	0.998 35	0.998 35	0.998 72	0.999 61	0.998 72

表 2 无涂敷 DTG 温度响应的线性拟合结果

Table 2 Linear fitting results of uncoated DTG temperature response

Sample	DTG8	DTG9	DTG10	DTG11	DTG12	DTG13
$K_{T,DTG}$	10.00	10.17	10.09	9.91	9.94	10.00
$R^2$	1	0.999 43	0.999 51	0.999	0.999 08	1

为了体现光纤传感器在温度测量方面的优越性,从 PI 涂敷 DTG 和无涂敷 DTG 中各选择一个 DTG 与电子温度传感器的测量结果进行比较。图 5 为光纤传感器与电子式温度传感器的温度响应对比图,其中黑线和红线分别表示温度连续变化时 DTG1 和 DTG8 中心波长偏移量的变化,蓝线表示水温不断变化时电子温度传感器测得的实际温度值。

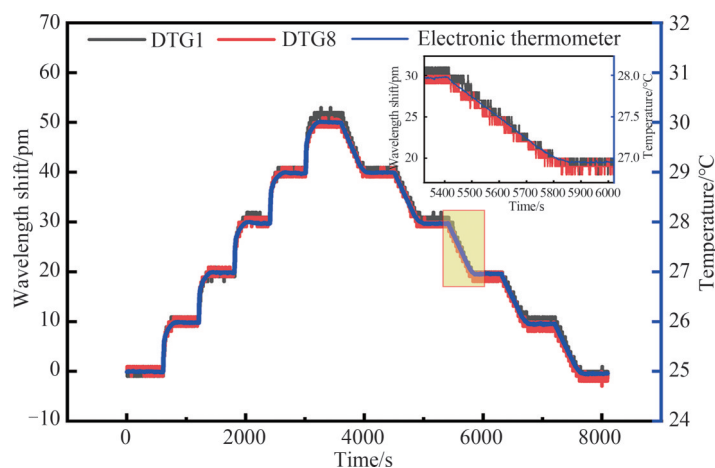


图 5 电子传感器与光纤传感器的温度响应对比

Fig. 5 Comparison of temperature response of electronic sensor and fiber optic sensor

从图 5 可知,在温度测量中,DTG1 和 DTG8 中心波长偏移量与电子温度传感器测量温度值的变化基本一致,表明设计的光纤传感器可以实时地反映温度的实际变化。而且,相比于电子温度传感器,光纤传感器中一个 DTG 就可以作为一个温度传感器,其尺寸更小,复用更简单。然而,光纤传感器在温度上升和下降阶段呈现为不对称的梯形,这是因为恒温水箱在降低相同温度时所需要的时间比升温时更长。为了使热循环时每个温度梯度的稳定时间基本相同,将升 1 °C 的测量时间设为 10 min,而降 1 °C 设为 15 min。而且,不论是升温还是降温,当到达同一温度时,DTG 的中心波长偏移量的变化基本一致,说明 DTG 在升温和降温时的灵敏度保持一致,DTG 在温度测量中良好的重复性。在热循环中,温度每变化 1 °C 时,DTG 相应中心波

长的偏移都在 10 pm 左右,表明传感器在测量温度变化时具有很高的稳定性。在实验过程中,由于光纤阵列温度解调仪的精度有限,分辨率只有 1 pm,所以传感器的温度分辨率为 0.1 °C。

### 3.2 温度和盐度测量

将光纤传感器浸泡在去离子水中 10 min 后取出,放入 5 mol/L 的高浓度 NaCl 溶液中,使聚酰亚胺充分失水收缩。再加入去离子水或者低浓度的 NaCl 溶液,使其逐渐稀释至 4 mol/L, 3 mol/L, 2 mol/L, 1 mol/L, 0.6 mol/L, 观察其盐度响应。其中每个盐度下的测量时间为 20 min。不使用固体 NaCl,是因为它溶解在水中需要较长的时间,在影响响应时间的同时也会影响其测量精度。在测量过程中,将电子温度传感器放置在光纤传感器的附近,以感测环境温度的变化。

无涂敷 DTG 的实际测温性能如图 6 所示,图 6 表明光纤传感器温度的应用值和电子温度传感器测量值之间的变化一致性。因为室温环境下的温度会在 1 °C 以内微小变化,而光纤阵列波长解调仪的精度有限,分辨率只有 1 pm,所以偏移量的变化曲线会出现一些毛刺,导致曲线不太平滑。

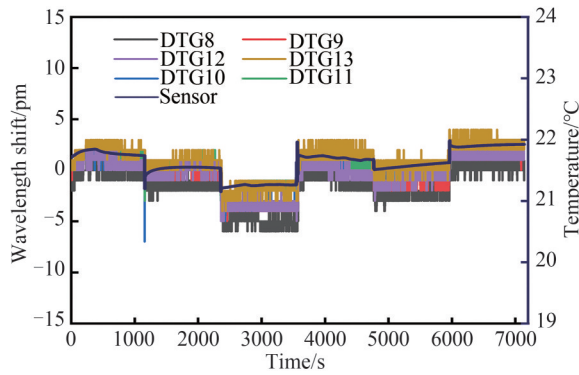


图 6 电子传感器测得温度与无涂敷 DTG 波长偏移量的对比

Fig. 6 Comparison of temperature measured by electronic sensor and wavelength shift of uncoated DTG

光纤传感器中 PI 涂敷 DTG 测量的盐度响应如图 7 所示。由图 7 可知,PI 涂敷 DTG 中心波长的偏移量与盐度的线性关系并不好,这是由于盐度的测量是在室温环境下进行的,并没有进行控温,在每个盐度梯度下的温度并不相同。

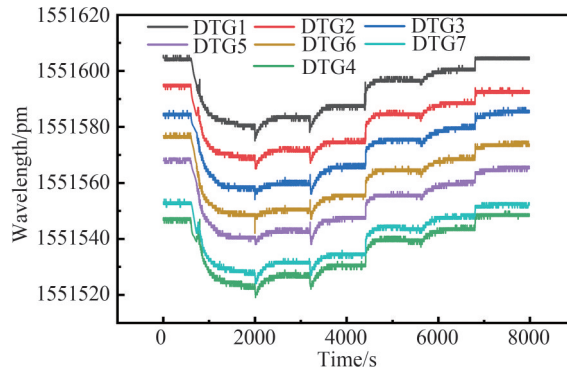


图 7 未进行温度补偿的 PI 涂敷 DTG 测量的盐度响应

Fig. 7 Salinity response of PI-coated DTG measurements without temperature compensation

将表 1 和表 2 得出的温度灵敏度与设定的盐度值代入式(9),使用式(10)进行温度补偿。其中,标定的温度为 25 °C,盐度为 0 mol/L。

$$\begin{bmatrix} T - 25 \\ S \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{S,PI} \cdot K_{T,DTG}} \begin{bmatrix} K_{S,PI} & 0 \\ -K_{T,PI} & K_{T,DTG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{DTG} \\ \Delta\lambda_{PI} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $T$ 为裸 DTG 测得的温度, $S$ 为调配的盐度, $\Delta\lambda_{FBG}$ 和 $\Delta\lambda_{PI}$ 的单位用 pm 表示, $\Delta T$ 的单位用 °C 表示, $\Delta S$ 和 $S$ 的单位用 mol/L 表示。基于式(10),可以同时确定环境温度和 PI 涂敷 DTG 在盐度影响下的中心波长的偏移量。

图8显示了温度补偿后PI涂敷DTG的盐度响应。其中,图8(a)为温度补偿后PI涂敷DTG随时间的波长响应,图8(b)为PI涂敷DTG在4 mol/L下随时间的波长响应。从图8(a)可知,DTG1~DTG7在相同盐度下其波长数据时域特性良好,而且随盐度变化的整体趋势基本一致,这表明将光纤光栅进行级联并没有影响光栅的性能,可以实现盐度的实时、准分布式的测量。从图8(b)可知,PI涂敷DTG在不同盐度下的波长变化趋势可分为跳变阶段,响应阶段和稳定阶段三个阶段。跳变阶段是因为加水操作时,水的冲击力会对PI涂敷DTG造成影响,随着烧杯内溶液的增加,水的冲击力对PI涂敷DTG的影响减小。不稳定阶段是指PI涂敷DTG响应盐度的时间段,稳定阶段是指PI涂敷DTG在当前盐度下已经稳定的时间段。

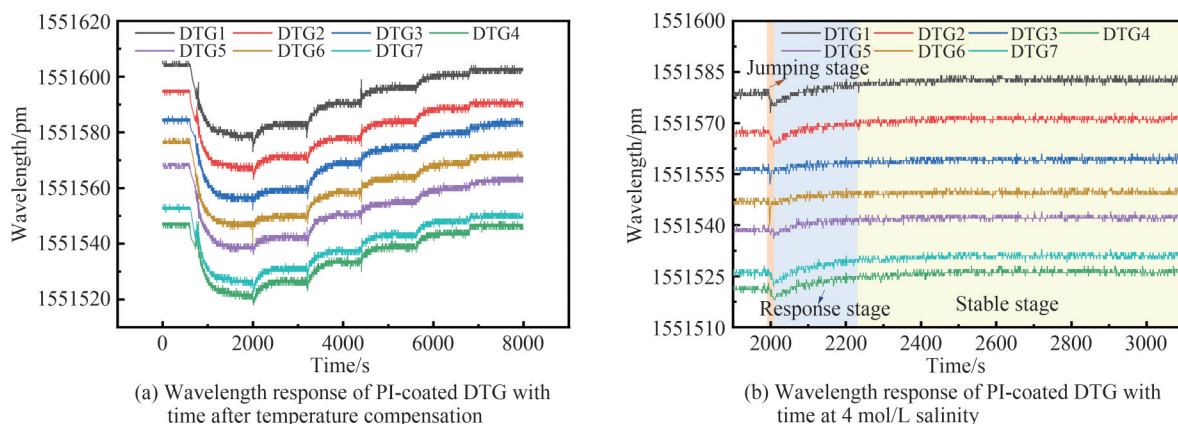


图8 温度补偿后的PI涂敷DTG测量的盐度响应

Fig. 8 Salinity response of temperature-compensated PI-coated DTG measurements

从PI涂敷DTG中随机选择一个DTG的测量结果与设定盐度值进行比较。图9为DTG7随盐度变化的动态响应变化,其中绿线为温度补偿后PI涂敷DTG中心波长偏移量的变化曲线,红线为设定盐度值的变化。当传感器从去离子水中移入5 mol/L的NaCl溶液中时,PI涂敷DTG的不稳定阶段所用时间更长,是由于溶液中浓度跨度太大,PI涂敷DTG的响应所需时间更长。当PI涂敷DTG在梯度相同的不同盐度下的稳定阶段基本一致,平均稳定时间为16 min。此外,稳定区PI涂敷DTG在梯度相同的相邻盐度曲线之间的距离相似,表明稳定波长与盐度之间存在良好的线性关系。且PI涂敷DTG在去离子水中时的中心波长偏移量大于在0.6 mol/L的NaCl溶液中时,这些结果验证了PI涂敷DTG测试结果在盐度传感中良好的重复性。

如图10所示,将温度补偿后的结果进行线性拟合,表3展现了其线性拟合结果。基于图10的拟合结果,可以看出PI涂敷DTG的中心波长偏移量随盐度的变化呈线性关系,符合PI的线性吸湿膨胀特性,证明了该温度补偿方案的有效性,表明了该传感器可以实现盐度的准确测量。同时也进一步证明了溶液中PI涂敷DTG和无涂敷DTG的温度依赖性分别满足图4(b)和(d)中显示的线性关系,表明该传感器可以实现温度的精确测量。从表3可以看出,温度补偿后PI涂敷DTG的平均盐度灵敏度约为 $-5.58 \text{ pm}/(\text{mol}/\text{L})$ 。

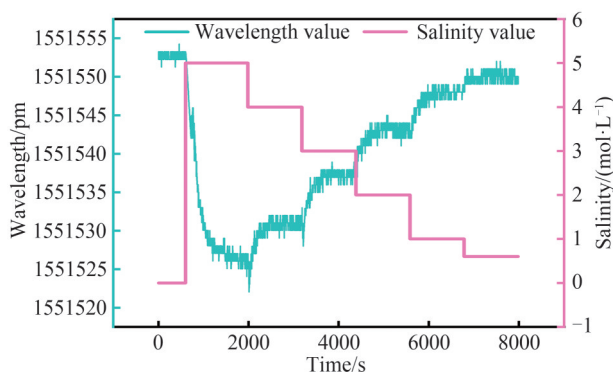


图9 DTG7随盐度变化的动态响应变化

Fig. 9 Dynamic response process of DTG7 with salinity

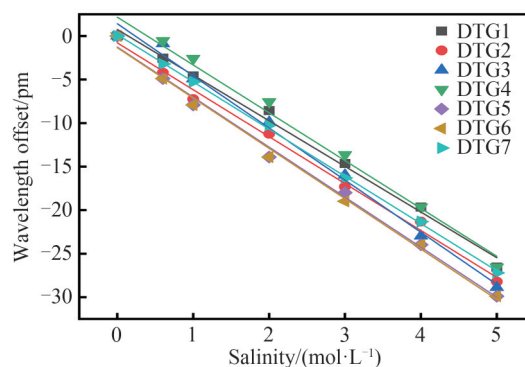


图10 温度补偿后的盐度响应

Fig. 10 Salinity response after temperature compensation



表3 温度补偿后盐度响应的线性拟合结果  
Table 3 Linear fitting results of the salinity response after temperature compensation

Sample	DTG1	DTG2	DTG3	DTG4	DTG5	DTG6	DTG7
$K_{S,PI}$	-5.24	-5.39	-5.99	-5.49	-5.75	-5.78	-5.43
$R^2$	0.992 47	0.993 3	0.992 11	0.982 51	0.992 74	0.993 23	0.999 21

本文提出的光纤传感器与现有文献之间的比较如表4所示。从表4可知,与其他传感器相比,该传感器的结构简单,可以准分布式测量海水的温度和盐度,具有较强的实用性。但是,该传感器对盐度的灵敏度较低,未来将探索提高盐度敏感度的方法。例如,增加PI涂层的厚度,以较长的响应时间为代价,可以进一步提高其盐度敏感性。较厚的涂层会产生较大的压力,从而导致较高的盐度敏感性。灵敏度随着厚度的增加而增强,但对盐度的响应也需要更长的时间。也可以适当减小光纤的直径,在PI涂层厚度不变的情况下,适当减小光纤包层的厚度,纤芯中光栅周围包层的表面积会极大减小,导致相同盐度变化产生的压力对光栅作用力更大,使得中心波长偏移量增大,进而提高传感器对盐度的灵敏度。此外,对聚酰亚胺薄膜进行掺杂增加其亲水性能,也能增加盐度敏感度。同时考虑到无涂敷DTG较弱的机械性能,也将进一步研究其封装方法。

表4 一些具有代表性的温度和盐度传感器的性能  
Table 4 Performance of some representative temperature and salinity sensors

Configuration	Temperature sensitivities	Salinity sensitivities	Multiplex	Fabrication complexity	Ref
MZI	-994.83 pm/°C	290.47 pm/‰	—	Complex	10
FP	6.85 nm/°C	50 nm/‰	—	Complex	11
SI	-0.728 nm/°C	0.367 nm/‰	—	Moderate	12
Lamellar PI-coated FBG	0.009 5 nm/°C	-0.035 8 nm/‰	—	Moderate	21
PI-Coated PCF	—	30.1 MHz/(mol·L <sup>-1</sup> )	Distributed	Moderate	23
This work	10.02 pm/°C	-5.58 pm/(mol·L <sup>-1</sup> )	Quasi-distributed	Simple	—

本文将多个PI涂敷DTG和无涂敷DTG直接串联构成了海水温盐准分布式传感器,虽然海水温度呈垂直分布的特点,海水温度在表面最高,平均为18°C左右,随深度增加其温度呈非线性的下降,在深度4 000 m以下平均温度为1.5°C左右<sup>[24]</sup>。但在传感器测量深度范围内海水的温度变化可忽略不计,故该传感器可以实现海水温度的精确测量与补偿,具有一定的实用性。

## 4 结论

本文提出了一种基于拉丝塔光纤光栅的准分布式温盐传感器,该传感器以PI涂敷的DTG作为盐度传感元件,PI涂层在与不同盐度的溶液接触时体积会膨胀或收缩,由盐度变化引起的膨胀或收缩反应被转换为加载在PI涂敷DTG上的轴向应变,通过监测其中心波长的漂移来准分布地测量盐度。在温度补偿系数测量实验中,PI涂敷DTG和无涂敷DTG都能精确测量出环境温度,且一致性良好,其温度灵敏度分别平均为10.24 pm/°C和10.02 pm/°C。在温盐同时测量实验中,整个系统处于室温环境,没有进行控温操作,该传感器仍能准确测量出溶液的温度,补偿后得到的盐度灵敏度平均为-5.58 pm/(mol/L)。实验证明,该传感器可以同时实时准分布式测量海水的温度和盐度,同时还具有测量范围广、测量准确度高、易于制造等优点,在海洋工程中有一定的应用前景。

### 参考文献

- [1] ALAPPATTU D P, WANG Qing, 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.
- [2] QIAN Yu, ZHAO Yong, WU Qilu, et al. Review of salinity measurement technology based on optical fiber sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 260:86-105.
- [3] ROEMMICH D, JOHNSON G C, RISER S, et al. The argo program observing the global ocean with profiling floats[J].

- Oceanography, 2009, 22(2):34-43.
- [4] PEER S, ZOUGHRI R. Comparison of water and saltwater movement in mortar based on a semiempirical electromagnetic model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2004, 53(4):1218-1223.
- [5] YU Yang, BIAN Qiang, LU Yang, et al. High sensitivity all optical fiber Conductivity-Temperature-Depth (CTD) sensing based on an Optical Microfiber Coupler (OMC)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 37(11):2739-2747.
- [6] MALARDE D, WU Z Y, GROSSO P, et al. High-resolution and compact refractometer for salinity measurements[J]. Measurement Science & Technology, 2008, 20(1):015204.
- [7] WANG Shanshan, LIU Tianqi, WANG Xin, et al. Hybrid structure Mach-Zehnder interferometer based on silica and fluorinated polyimide microfibers for temperature or salinity sensing in seawater[J]. Measurement, 2018, 135:527-536.
- [8] MENG Hongyun, SHEN Wei, ZHANG Guanbin, et al. Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Sensors and Actuators B, 2010, 150(1):226-229.
- [9] NGUYEN L V, VASILIEV M, ALAMEH K. Three-wave fiber Fabry-Pérot interferometer for simultaneous measurement of temperature and water salinity of seawater[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011, 23(7):450-452.
- [10] LIU Tianqi, WANG Jing. Splicing point tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of temperature and salinity in seawater[J]. Optics Express, 2019, 27(17):23905-23918.
- [11] ZHENG Hongkun, ZHAO Yong, LV Riqing, 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.
- [12] YANG Chengkun, ZHANG Shengqi, SHI Donglei, et al. Simultaneous measurement of salinity and temperature using a Sagnac interferometer based on concatenated polarization-maintaining fiber tapers[J]. Applied Optics, 2021, 60(28):8904-8909.
- [13] ZHAO Yong, ZHAO Jian, PENG Yun, et al. Simultaneous measurement of seawater salinity and temperature with composite fiber-optic interferometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9502908.
- [14] ZHANG Xiangdong, LI Yulin, PENG Wenda, et al. Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on FBG[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10):1166-1169.  
张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2003, 32(10):1166-1169.
- [15] SAINI P K, PRAKASH O, KUMAR J, et al. Relative humidity measurement sensor based on polyvinyl alcohol coated tilted fiber Bragg grating[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12): 125123.
- [16] ZHONG Yusong, DONG Xinyong, XU Pengbai, et al. Optical fiber and gelatin based Fabry-Perot interferometric humidity sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1206003.  
钟禹宋, 董新永, 徐鹏柏, 等. 光纤-明胶法布里-珀罗干涉湿度传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1206003.
- [17] MEN Liqiu, LU Ping, CHEN Qiyong. A multiplexed fiber Bragg grating sensor for simultaneous salinity and temperature measurement[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(5): 053107.
- [18] STAJANCA P, HICKE K, KREBBER K. Distributed fiber optic sensor for simultaneous humidity and temperature monitoring based on polyimide-coated optical fibers[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5279.
- [19] WU Chuang, GUAN Baiou, LU Chao, et al. Salinity sensor based on polyimide-coated photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(21):20003-20008.
- [20] LUO Dong, MA Jianxun, IBRAHIM Z, et al. Etched FBG coated with polyimide for simultaneous detection the salinity and temperature[J]. Optics Communications, 2017, 392:218-222.
- [21] SUN Mengya, JIANG Hongtao, SHI Bin, et al. Development of FBG salinity sensor coated with lamellar polyimide and experimental study on salinity measurement of gravel aquifer[J]. Measurement, 2019, 140:526-537.
- [22] LUO Zhihui, WEN Hongqiao, LI Xiaofu, et al. Online reflectivity measurement of an ultra-weak fiber Bragg grating array [J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(10): 105102.
- [23] ZHANG Hongying, TENG Lei, DONG Yongkang. Distributed salinity sensor with a polyimide-coated photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18):5219-5224.
- [24] LI Qingquan, TAN Juan, WANG Lanning, et al. Simulation of distribution of carbon and nutrient in the ocean based on the global oceanic carbon cycle model MOM4\_L40[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1):63-78.  
李清泉, 谭娟, 王兰宁, 等. 全球海洋碳循环模式 MOM4\_L40 对碳和营养物质自然分布的模拟[J]. 地球物理学报, 2015, 58(1):63-78.

## Quasi-distributed Temperature and Salt Sensor Based on Drawing Tower Grating

WANG Yuqi<sup>1,2</sup>, PAN Zhen<sup>1,2</sup>, JI Yadian<sup>1,2</sup>, FAN Dian<sup>1</sup>, ZHOU Ciming<sup>1</sup>

(1 National Engineering Research Center for Optical Fiber Sensing Technology and Network, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2 School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Seawater temperature and salinity are the most critical and fundamental physical parameters necessary for all oceanographic disciplines, which have important theoretical value and practical significance for studying ocean climate change, monitoring marine ecological environment, exploiting and utilizing marine resources, and ensuring military security, etc. The development of high-performance sensors for seawater parameter measurement has become one of the research hotspots. In recent years, optical fiber sensing methods have provided a new solution for high precision measurement of physical parameters with the advantages of anti-electromagnetic interference, corrosion resistance, small size, and real-time distributed measurement. At present, the widely studied optical fiber temperature and salt sensors mainly include optical fiber interference type sensors and fiber optic grating type sensors. Researchers at home and abroad have realized the design of optical fiber interference type temperature and salt sensors by micromachining the optical fiber, such as taper pulling, reverse taper pulling, side polishing, dislocation welding and core diameter mismatch welding, and achieved some research results. However, there are generally problems such as great fabrication difficulty and poor structural stability, which are difficult to meet the application requirements of marine engineering. In contrast, optical fiber grating type temperature and salinity sensor are mainly designed based on Fiber Bragg Grating (FBG), and a single FBG can form a sensor, which is simpler to manufacture, more stable in structure and more adaptable to the environment. However, the current fiber grating temperature and salinity sensors mostly adopt FBG with high reflectivity, which can only perform discrete point measurements and cannot realize distributed sensing. Besides, previous reports mostly used spectrometer demodulation, which cannot observe the real-time response of temperature and salinity. Therefore, a quasi-distributed temperature and salt sensor based on Drawing Tower Grating (DTG) is proposed in this paper. The sensor uses DTG coated with Polyimide (PI) as the salinity sensing element. The PI coating expands or contracts linearly in volume when in contact with solutions of varying salinity. The expansion or contraction response caused by the change in salinity is converted into an axial strain loaded on the PI-coated DTG, and the salinity can be measured by monitoring the drift of its central wavelength. During the experiment, the central wavelength of the fiber grating is demodulated in real time by the fiber grating array demodulator, and its data is collected and recorded by the computer in real time. In the temperature compensation coefficient measurement experiment, the optical fiber sensor was placed in the circulating temperature field from 25 °C to 30 °C and then back to 25 °C. Compared with the electronic temperature sensor used for calibration, it can be found that both PI coated DTG and uncoated DTG can accurately measure the ambient temperature, and have good consistency and repeatability. Their temperature sensitivities are 10.24 pm/°C and 10.02 pm/°C respectively. In the experiment of simultaneous temperature and salt measurement, the fiber optic sensor was placed into a high concentration NaCl solution of 5 mol/L to make the PI coating lose water and shrink sufficiently. Then deionized water or low concentration NaCl solution was added to gradually dilute it to 4 mol/L, 3 mol/L, 2 mol/L, 1 mol/L, and 0.6 mol/L to observe its salinity response. In order to simulate the actual working environment of the sensor, the whole system was in a room temperature environment without temperature control operation, and the sensor was still able to measure the temperature of the solution accurately, and the average salinity sensitivity obtained after compensation was  $-5.58$  pm/(mol/L). The experimental results show that the sensor can simultaneously measure the temperature and salinity of seawater in real-time and quasi-distributed, and also has the advantages of wide measurement range, high measurement accuracy and easy fabrication, which has certain prospects for application in marine engineering.

**Key words:** Salinity measurement; Temperature compensation; Drawing-tower gratings; Polyimide; Quasi-distributed

**OCIS Codes:** 060.2370; 060.3735; 160.5470