

# 激光与光电子学进展

## 光纤海洋温盐深传感器研究进展

周灵钧<sup>1,2</sup>, 于洋<sup>1,2,3\*</sup>, 孟洲<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050;

<sup>3</sup>国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 针对海洋水文环境参量实际测量需求,重点介绍了现有各型光纤温盐深仪(CTD)传感器的传感机理、研究进展、性能指标、存在的技术瓶颈等问题,并简要介绍海洋环境参量传感阵列研究进展与工程应用情况。综合国内外研究进展来看,光纤光栅型CTD传感器稳定性和环境适应性较强,已初步满足海洋环境工程监测需求,并且在海洋环境参量传感阵列化研究方面具有重要应用价值;而光纤表面等离子共振(SPR)型CTD和拉锥光纤型CTD灵敏度较高,在海洋环境多参量一体化监测方面具有较大的应用潜力。最后,在简要概述以“海洋物联网”为代表的新一代海洋监测网络发展需求的基础上,对海洋环境参量全光纤传感器发展趋势与技术需求进行展望,以期从事相关研究的学者提供参考资料与研究思路。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 海洋环境监测; 温盐深传感; 多参量监测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306019

## Review of Fiber Optic Ocean Conductivity-Temperature-Depth Sensor

Zhou Lingjun<sup>1,2</sup>, Yu Yang<sup>1,2,3\*</sup>, Meng Zhou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

<sup>3</sup>College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** In response to the practical measurement requirements of marine hydrological environmental parameters, this article focuses on the sensing mechanism, research progress, performance indicators, and existing technical bottlenecks of various types of fiber optic ocean conductivity-temperature-depth (CTD) sensors, and also briefly introduces the research progress and engineering application of marine environmental parameter sensor arrays. Judging by the research progress at home and abroad, the fiber Bragg grating CTD sensor has strong stability and environmental adaptability. First, it has initially satisfied the demand of marine environmental engineering monitoring and has had important application value in the research of marine environmental parameter sensing arrays; while fiber-optic surface plasmon resonance (SPR) based CTD and tapered fiber-based CTD have high sensitivity so they have good potential for application in multi-parameter integrated monitoring of the marine environment. Finally, based on the brief description of the development needs of a new generation of marine monitoring networks represented by the “Marine Internet of Things”, it proposed the developing trend and technical requirements of all-optical sensors for marine environmental parameters, which will provide scholars engaged in related research with reference materials and ideas.

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-30; 录用日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61805278)、传感技术联合国家重点实验室基金(SKT2001)

通信作者: \*yuyang08a@nudt.edu.cn

**Key words** fiber optics; fiber optic sensor; marine environment monitoring; conductivity-temperature-depth sensing; multi-parameter monitoring

**OCIS codes** 060.2370; 250.0040; 010.4450

## 1 引言

海洋环境各要素参量直接影响海洋经济开发、海洋环境保护、海上装备及设备运行效能与安全等海洋相关活动,对海洋各环境要素进行实时、高效、快速、原位、大规模、连续监测,是开发海洋、经略海洋以及保护海洋环境必须具备的能力。例如:海水温度、盐度分布直接决定海洋跃层分布,进而影响海上及水下平台运行安全;海水的温度、盐度、深度、流速等环境要素还直接决定水声传播特性,进而决定声呐探测设备的使用方式和工作性能等<sup>[1-2]</sup>。因此,对海洋温度、盐度、深度等水文环境要素进行原位、实时、精确监测意义重大。

目前,海洋环境监测装备多为电学设备如温盐深仪(CTD),或多或少存在价格高昂、体积大、布放难度大、容易受电磁干扰等问题,并难以满足海水表面特性测量等极端环境监测需求。并且,各环境参量多采用分立设备一一进行监测和信号处理,要实现海区大范围监控,需要使用大量传感器组合阵列,因此存在投资巨大、系统复杂且可靠性低、数据兼容与综合处理困难等问题。另外,从国内外海洋环境监测网络建设来看,潜/浮标系统、投弃式海气界面观测设备等小型化自主海洋环境监测平台在水下、海气界面快速机动组网观测系统建设等方面展现出巨大优势,成为构建未来“海洋物联网”的主要平台<sup>[3]</sup>。但受限于各型自主监测平台载荷不一、所载传感器集成度低及功能单一等,自主海上平台在环境监测功能多样性、复杂环境适应性等方面仍需改进,这也对所挂载的海洋环境监测系统提出了新的要求。目前,各型海洋监测传感器多为分立式电学传感器,要实现多参量兼容传感集成仍有难度。因此,要满足小型化自主海上平台的海洋环境多参量监测需求,需进一步开发数据兼容性强、成

本低廉、结构紧凑,且能满足多参量同步高精度原位监测需求的新型海洋环境参量传感器及检测技术。而要满足大面积海洋基础数据获取与实时精确预报需求,还需开发便于大规模成阵布放的海环境参量监测技术与装备。

近些年,各类型光纤传感器因具有结构紧凑、携带轻便、制作简单、成本低、灵敏度高、便于集成复用、可实现多参量原位传感等优势,在海洋环境监测应用中受到广泛关注。目前,针对海洋环境监测的应用需求,各国学者相继开展了基于光纤的磁场、湿度、温度、盐度、压力(深度)等海洋环境参量传感器的研制工作<sup>[4-8]</sup>。根据传感载体及传感机理的差异,光纤传感器主要包括光纤光栅型、光纤干涉仪型、光子晶体光纤型、光纤表面等离子基元谐振效应型、拉锥光纤型等。针对海洋水文环境参量的实际测试需求,本文将重点介绍各类光纤CTD传感器的传感机理、研究进展、性能指标、存在的技术瓶颈等,并简要介绍海洋环境参量传感阵列的研究进展与应用情况,进而对海洋环境参量全光纤传感器的发展趋势与技术需求进行展望,以期为从事相关研究的学者提供参考资料与研究思路。

## 2 光纤CTD传感器

### 2.1 光学海洋CTD传感原理

海水的温度、盐度、深度是海洋物理状态方程的最基本物理参量,也是物理海洋学的重要研究参量。大范围在线监测这些参量对于全球生态保护、气候变化动态监控、抑制全球气候变暖、水下装备安全运行与目标探测具有重要意义,因此海洋CTD是海洋观测实践中应用最为广泛的基础装备之一。海水的折射率 $n$ 与海水的盐度、温度、深度(即压力,海水深度与压力严格相关)密切相关,且满足如下经验公式<sup>[9]</sup>

$$n = 1.3247 + 3.3 \times 10^3 \lambda^{-2} - 3.2 \times 10^7 \lambda^{-4} - 2.5 \times 10^{-6} T^2 + (5 - 2 \times 10^{-2} T)(4 \times 10^{-5} S) + (1.45 \times 10^{-5} P)(1.021 - 6 \times 10^{-4} S)(1 - 4.5 \times 10^{-3} T), \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为探测光波长; $T$ 为海水温度; $S$ 为海水盐度; $P$ 为海水压强。因此,对海水盐度和温度的测量可以通过测试海水折射率实现,这也为基于光学方

式的海洋CTD监测奠定了理论基础。早在1989年,Minato等<sup>[10]</sup>便提出了基于光学校镜法的盐度测量传感系统。该系统通过测试海水折射角变

化引起的光束位置变化(引起监测光强度变化)实现海水折射率标定,进而实现海水盐度测量功能。该系统组成如图 1 所示,光源发出的光束通过低损耗、低噪声、耐腐蚀的光纤传输并穿过海水样品单元。海水样品单元如图 1(b)所示,该器件可分为两部分:

一部分充满蒸馏水作为参考;另一部分充满海水。折射角的大小(即输出光束位置)由参考液体和待测液体的折射角之差决定。通过使用位置探测器(PSD)观察光束的位置偏差,可以实现盐度测量。通过校准该系统能实现盐度测量精度为 5‰。

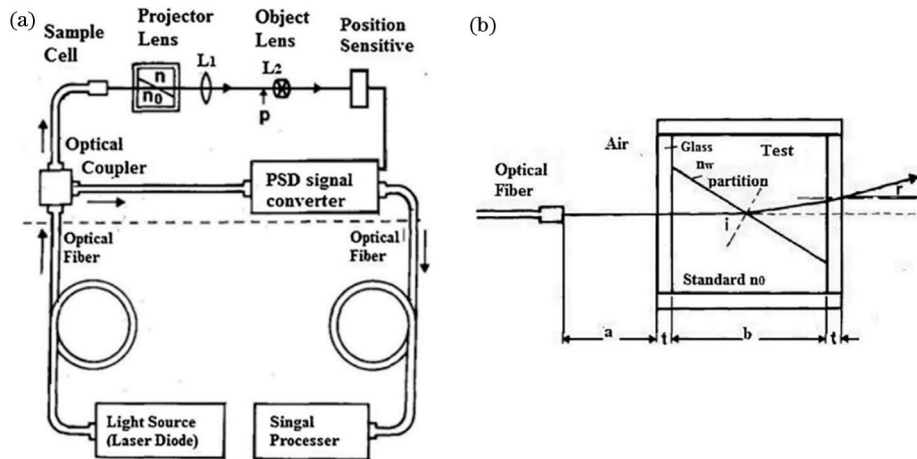


图 1 基于光学棱镜法的折射型盐度传感器<sup>[10]</sup>。(a)盐度测量系统示意图;(b)光通过样品单元折射示意图  
Fig. 1 Refraction type salinity sensor based on optical prism method<sup>[10]</sup>. (a) Schematic of salinity measurement system; (b) schematic of light refraction through the sample unit

基于光学棱镜法的盐度测量传感系统为基于光学方式的海水 CTD 传感器研究奠定了较好的理论研究基础与技术路线。但光学棱镜法的盐度、温度测试灵敏度有限,整个棱镜系统较为复杂,传感头不仅需要光学组件,还需要电子组件,所以很难适应恶劣的水下环境;并且在棱镜海水盐度测试系统中,光纤仅起到光场信号传输的作用,并未作为传感单元实现光场信号调制。而光纤光栅、光子晶体光纤、倏逝场传输型光纤等光场折射率调控型光纤的出现,为全光纤 CTD 研制提供了良好的物质研究基础与实现载体。一方面,海水温度、压力变化会改变光纤波导的折射率,进而会对光纤内传输光场的特征量(特征波长、模式、相位等)产生调控作用;另一方面,海水折射率变化会改变倏逝场传输型光纤波导的边界条件,进而实现光场调控。基于以上原理,可方便实现全光纤 CTD 传感监测。目前,根据传感参量的数量,全光纤海洋 CTD 传感器可分为单参量型,双参量型,以及温、盐、深参量同步传感型。根据传感光纤载体及传感机理的差异,全光纤海洋 CTD 传感器可分为光纤光栅型、光子晶体光纤型等。

## 2.2 光纤光栅型

光纤光栅是一种无源滤波器件,其通过一定方法使得光纤纤芯的折射率发生轴向周期性调制而

形成衍射光栅。根据写入光栅的长度,光纤光栅可分为短周期光纤光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPG)。光纤光栅为波长调制型器件,其中 FBG 对压力和温度敏感。当 FBG 感受到环境压力或温度发生变化时,其传输特征光谱会受到调控,因此将特定封装结构设计的 FBG 置于海水中,通过分析特征波长的变化情况可以实现对海水压力(深度)和温度的传感功能。而 LPG 光谱的透射率会受到周围环境折射率调控,因此适合监测环境变化及生物应用<sup>[11]</sup>,即可直接实现海水盐度传感功能。

由于裸 FBG 对温度和压力同时响应,为有效解决交叉敏感问题,可对 FBG 涂覆特定材料(如金属、聚合物等),以实现不同参量差别敏感。另外,特殊的涂覆材料还可以将盐度变化转换成应力变化,从而实现温、盐、深三参量测量。如 2002 年, Cong 等<sup>[12]</sup>提出一种采用 FBG 结合聚丙烯酰胺水凝胶制成的盐度传感器。聚丙烯酰胺水凝胶是一类亲水性聚合物,吸水后会溶胀而不溶解,在外部盐度变化的情况下,它可以吸水膨胀或脱水收缩。该传感器探头的结构如图 2(a)所示,其中探头的光栅区域被水凝胶包裹,当聚丙烯酰胺水凝胶吸水时,水凝胶中的机械膨胀推动固定在 FBG 上的固定装置。随着光纤被固定装置物理拉伸,布拉格光栅的周期变长,导致输出光谱的特征波长出现漂移。

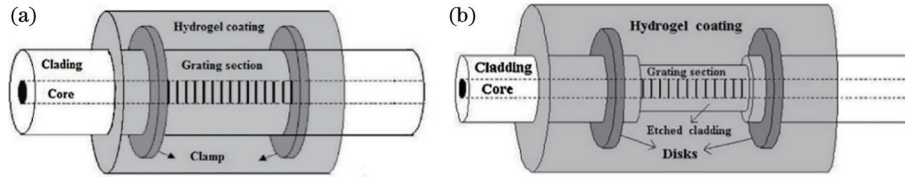


图2 FBG 盐度传感器。(a)直接涂覆水凝胶结构<sup>[12]</sup>;(b)刻蚀后涂覆水凝胶结构<sup>[13]</sup>

Fig. 2 FBG salinity sensor. (a) Structure coated with hydrogel directly<sup>[12]</sup>; (b) structure coated with hydrogel after etching<sup>[13]</sup>

2003年, Liu等<sup>[13]</sup>优化了这种结构。他们通过使用体积分数为48%的氢氟酸溶液去除部分包层并蚀刻光栅区域, 光纤直径被腐蚀到 $37.5\ \mu\text{m}$ , 传感器探头如图2(b)所示。从实验数据可以看到, 优化结构的传感器盐度灵敏度可提升约5倍, 达到 $10.4\ \text{pm}/\text{‰}$ 。

2008年, 加拿大纽芬兰纪念大学的Men等<sup>[14]</sup>采用双光纤光栅级联传感器设计方案, 实现了海水温度和盐度双参量同步传感功能, 其中盐度灵敏度约 $1.6\ \text{pm}/\text{‰}$ , 温度灵敏度约 $16.5\ \text{pm}/\text{°C}$ 。该传感器结构如图3所示, 其中一个光栅涂覆聚酰亚胺构成盐度感应区, 另一个光栅涂覆只对温度敏感的丙烯酸膜。

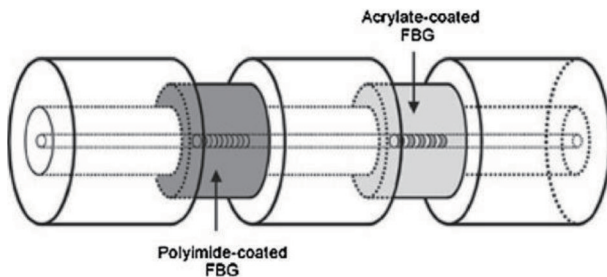


图3 同时测量盐度和温度的FBG传感器<sup>[14]</sup>

Fig. 3 FBG sensor that simultaneously measures salinity and temperature<sup>[14]</sup>

基于FBG的压力传感研究起步较早且成果丰富, 早在1993年, Xu等<sup>[15]</sup>首次将裸FBG放置在高压环境中进行测试, 实现了灵敏度约 $3\ \text{pm}/\text{MPa}$ 的气压传感。为实现更高灵敏度的压力测试, 1999年Peng等<sup>[16]</sup>首次报道在PMMA光纤中刻写可与二氧化硅FBG媲美的光栅, 其典型杨氏模量值为 $3.3\ \text{GPa}$ , 是二氧化硅FBG的 $1/20$ , 理论上可获得更高的压力响应。此外, 聚合物FBG(PFBG)具有更高的灵活性, 与二氧化硅FBG相比, 可承受较大的弯曲且不易碎。Bhowmik等<sup>[17]</sup>使用PFBG实现了灵敏度为 $200\ \text{pm}/\text{MPa}$ 的静水压力传感能力, 这比裸二氧化硅FBG高65倍。

基于光纤光栅的CTD传感器具有结构简单、环境适应性强、性能稳定等优势, 因此在海洋环境监

测工程实践中已得到应用。但该类光纤CTD的灵敏度较低, 虽然通过涂覆增敏材料改进结构或减小包层的厚度来提升灵敏度, 但也会带来力学性能降低等问题, 使其无法适应恶劣的海洋环境。需要进一步说明的是, 光纤光栅传感器在成阵复用应用中具有巨大优势, 如能有效提升光纤光栅型CTD的灵敏度并兼顾机械稳定性, 从而构建高灵敏度CTD光纤阵列, 则有望进一步提升该类型CTD的实际工程应用价值(例如在中尺度环流与海洋内波测试中的应用)。

### 2.3 光纤干涉仪型

光纤干涉测量方法是一种利用光干涉原理进行物理、化学参量传感的技术方法, 通常定义两个或多个光束的干涉叠加, 并通过评估组合光束之间的相位差实现物理参量的测量。根据工作原理, 干涉型传感器可分为法布里-珀罗(F-P)干涉仪<sup>[18]</sup>、Sagnac干涉仪<sup>[19]</sup>、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪<sup>[19]</sup>及多模干涉式<sup>[20]</sup>传感器。

F-P干涉仪一般是由两个平行反射面构成的多光束干涉仪, 其特征干涉光谱主要由两平行反射面之间(即F-P腔)的光程差决定。如在F-P腔腔体内填充通光液体, 则可以实现对待测液体的折射率传感。基于此, 2010年, Nguyen等<sup>[21]</sup>提出并验证了一种基于光纤F-P腔干涉原理的新型盐度传感器。如图4所示, 该传感器利用聚焦离子束磨削技术在单模光纤的末端钻一个孔, 从而构建出F-P干涉仪。该结构在盐度测量中具有较高的稳定性, 最高灵敏度达 $6.8\ \text{pm}/\text{‰}$ 。从实验结果来看, 该F-P干涉仪型盐度传感器灵敏度还较低, 并且制造工艺较为复杂, 因此该类型的传感器还有待改进。

2015年, 深圳大学的王义平课题组通过在普通单模光纤上封盖聚合物材料, 构成了一种超紧凑的F-P干涉仪, 结构如图5所示<sup>[18]</sup>。该F-P干涉仪的力学性能稳定, 适用于恶劣环境下的高灵敏度压力和温度传感, 并分别实现了 $249\ \text{pm}/\text{°C}$ 的温度灵敏度和 $1130\ \text{pm}/\text{MPa}$ 的压力灵敏度。该传感器会同时

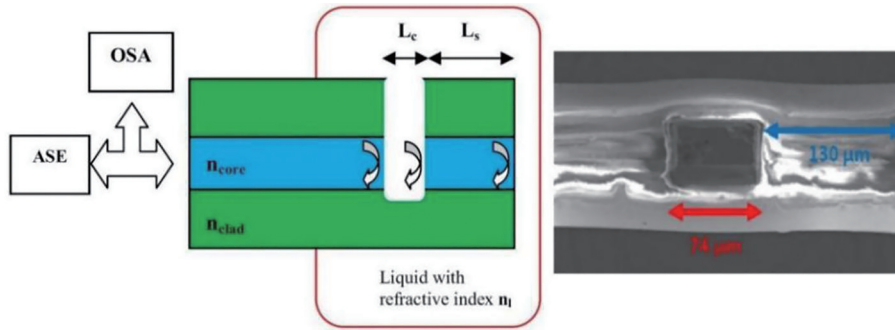


图 4 基于 F-P 腔干涉仪的盐度传感器<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Salinity sensor based on F-P cavity interferometer<sup>[21]</sup>

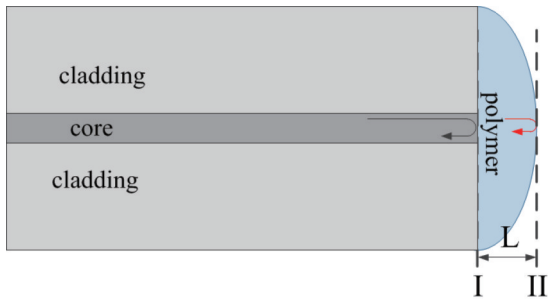


图 5 基于光纤尖端 F-P 干涉仪的温度压力传感器结构<sup>[18]</sup>  
Fig. 5 The structure of temperature and pressure sensor based on fiber tip F-P interferometer<sup>[18]</sup>

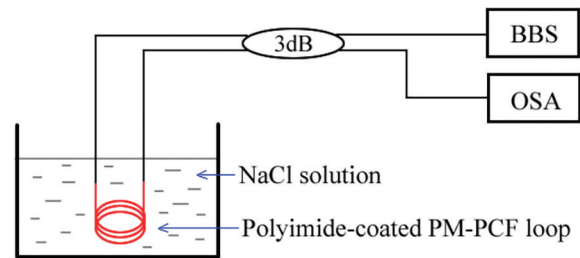


图 6 基于 Sagnac 干涉仪的盐度测量装置示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Schematic of salinity measurement device based on Sagnac interferometer<sup>[22]</sup>

响应环境温度和压力变化,但是不同波长下灵敏度差异较大,因此可通过求解压力和温度灵敏度矩阵方程式来同步实现温度和压力双参量传感。可以预见的是,如将构建 F-P 干涉仪的光纤端面聚合物材料换成水凝胶等材料,该型传感器有望实现温度、盐度、深度三参量传感。

Sagnac 干涉仪早期被广泛用于角速度传感,而经过特定光路结构设计会对温度敏感。2011 年, Zhang 等<sup>[19]</sup>研制出一种基于熊猫光纤的 Sagnac 干涉仪,并通过实验证明其具有高灵敏度测温功能。他们利用 Jones 矩阵从理论上分析了此 Sagnac 干涉仪的温度传感原理(即由热光效应引起的熊猫光纤双折射变化),并实现了高达 1.46 nm/°C 的温度灵敏度。2014 年,香港理工大学的 Wu 等<sup>[22]</sup>设计了一种基于 Hi-Bi 光子晶体光纤的 Sagnac 干涉仪盐度传感器,系统结构如图 6 所示。该 Sagnac 干涉仪主要由一个 3 dB 耦合器和一小段涂有聚酰亚胺的 Hi-Bi 光子晶体光纤组成,实现了盐度灵敏度为 11.12 pm/‰ 的传感功能。该传感器具有灵敏度高、尺寸紧凑和易于制造的优点。为进一步提高该类型盐度传感器的灵敏度,该课题组将光子晶体光纤替换成微纳光纤,实现了灵敏度高达 1.95 nm/‰

的盐度传感功能<sup>[23]</sup>。从上述研究结果可见,Sagnac 干涉仪结构就有很强的功能拓展性,其与特种光纤结合将展现独特的传感应用价值。

M-Z 干涉仪可以用来观测双相干光束经过不同路径(即可引入待测物理参量的导光介质)后所产生的相对相位变化,目前光纤 M-Z 干涉仪已被广泛用于振动<sup>[24]</sup>、压力<sup>[24-25]</sup>、温度<sup>[26]</sup>、电流<sup>[27]</sup>等物理参量传感。为提高 M-Z 干涉仪的温度灵敏度以满足高分辨率温度测试需求,哈尔滨工业大学的 Zhang 等<sup>[28]</sup>(2013 年)提出一种基于 M-Z 干涉仪嵌套环形谐振器的温度传感器。该传感器的光路结构如图 7 所示,光纤环与 M-Z 干涉仪的一个臂耦合,温度变化会在谐振频率处引起相移。通过谐振腔的色散增强效应,可明显提高传感器的温度灵敏度(可达 320 rad/°C),与普通 M-Z

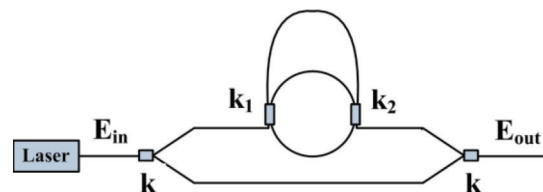


图 7 基于 M-Z 干涉仪嵌套环形腔的温度传感器<sup>[28]</sup>

Fig. 7 Temperature sensor based on nested annular cavity of M-Z interferometer<sup>[28]</sup>

干涉仪相比,该灵敏度提高了数十倍<sup>[27]</sup>。

2012年,墨西哥塔毛利帕斯自治大学的Guzman-Sepulveda等<sup>[29]</sup>研制出一种基于双芯光纤(TCF)的M-Z干涉仪,并将其用于高灵敏度盐度传感研究。该传感器M-Z干涉仪的结构如图8所示,通过在两根单模光纤中熔接TFC制作而成。因部分光场会耦合到TCF包层内形成包层模,因此该M-Z干涉仪除了存在双芯中间基膜的干涉外,还存在多模干涉。即当周围介质折射率发生变化时,包层模的有效折射率会改变,对干涉仪透射谱产生调控作用,从而实现盐度传感功能。该传感器在0~22.6‰的盐度下,盐度传感灵敏度可达253.77 pm/‰。

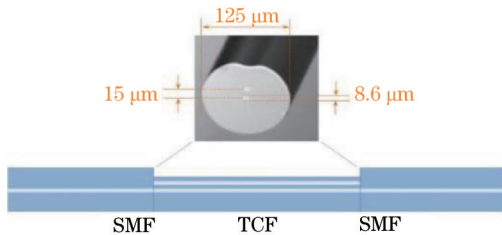


图8 基于双芯光纤的盐度传感器<sup>[29]</sup>

Fig. 8 Salinity sensor based on two-core optical fiber<sup>[29]</sup>

从上述研究不难发现,光纤多模干涉仪的传感光纤中存在多包层模式,因此对光纤外环境折射率变化敏感,这也为光纤干涉型传感器实现海水盐度传感提供了有效的技术路径。而光纤多模干涉通过光纤错位熔接、拉锥、多种光纤混合熔接等方式实现。例如,Meng等<sup>[30]</sup>(2014年)研制出一种基于无芯光纤(NCF)与单模光纤混合熔接的光纤多模干涉,同样将其进行盐度传感研究,并实现了灵敏度为19.4 pm/‰的盐度传感。

综上,虽然光纤干涉型CTD传感器研究取得了一定成果,但大多只能实现单一或双参量传感,且存在灵敏度有限、结构稳定性差等问题。因此,要实现海水的温度、盐度、深度3个参量同步传感,并满足海洋环境工程应用需求,还需进一步开展相关研究工作。

#### 2.4 光子晶体光纤型

光子晶体光纤(PCF)又被称为微结构光纤(MSF),近年来受到广泛关注。它的横截面上的折射率分布较复杂,通常含有不同排列形式的空气孔,这些气孔的尺度与光波波长大致在同一量级。相比于传统光纤,PCF的包层折射率可以高于纤芯的有效折射率。PCF具有易耦合、低弯曲损耗、特殊波导色散等特点,在生物传感和气体传感等方面展现出较

高的应用价值。由于PCF存在空气孔,如在其中填充特定的折射率匹配液(IMF),可实现环境温度传感功能(IMF的折射率会随周围温度的变化而变化)<sup>[4, 31-32]</sup>。同样,将海水引入PCF空气孔中,则可实现海水盐度传感功能。例如:2017年,Vigneswaran等<sup>[33]</sup>使用选择性填充的PCF实现了海水盐度传感功能。如图9所示,该传感器将海水样本注入PCF的 $d_2$ 气孔。随着海水盐度的变化,空芯模式的有效折射率发生变化,从而导致 $x$ 偏振和 $y$ 偏振的反射波长漂移,进而通过跟踪特征波长实现盐度传感表征,灵敏度分别为可达5405.4 nm/RIU和5675.67 nm/RIU。

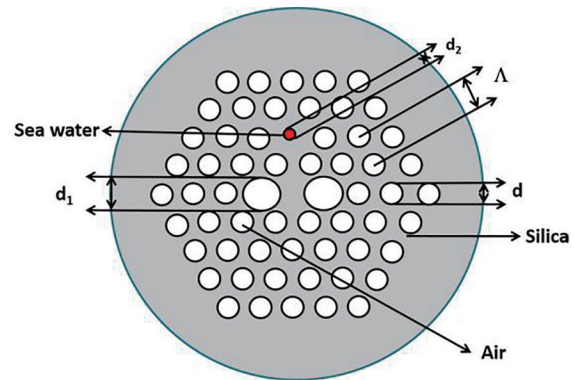


图9 基于PCF的传感器剖视图<sup>[33]</sup>

Fig. 9 A cross-sectional view of PCF-based sensor<sup>[33]</sup>

在实验环境中,PCF空气孔中的待测液体或IMF通常是通过特定的小型压力泵注入的<sup>[4]</sup>,而在实际海洋监测环境中,很难选择性地海水填充到PCF的气孔中。因此,将PCF直接应用于海洋CTD传感还有难度。而借鉴前文所述的研究成果,将PCF与干涉仪、长周期光栅等传感技术相结合,则有望实现更好的传感功能。

#### 2.5 光纤SPR型

光纤表面等离子共振(SPR)是指光纤表面的倏逝波与镀在光纤表面的金属膜发生的等离子激元效应,一般通过在倏逝场传输型光纤表面镀一层金、银、氧化铝、二氧化钛等金属膜制作而成,金属膜的厚度通常小于100 nm。SPR的产生需要光纤倏逝场波矢与金属表面等离子波满足波矢匹配条件,这与表面金属的有效折射率相关,而表面金属的有效折射率又受与金属薄膜接触的环境材料折射率调控<sup>[34]</sup>。因此,基于SPR效应可以实现高灵敏的环境介质折射率传感,并在生命科学、医疗检测、药物筛选、食品检测、环境监测、毒品检测以及法医鉴定等领域得到广泛的应用研究<sup>[34-37]</sup>。Esteban

等<sup>[38]</sup>受此启发进行了盐度传感研究,并实现了较高灵敏度的盐度传感。

2016年,墨西哥的 Velázquez-González 等<sup>[39-40]</sup>提出一种基于单模光纤镀金的光纤 SPR 结构,并实现了灵敏度为 2323.4 nm/RIU 和 -2.850 nm/°C 的折射率和温度传感功能。该传感器通过在多模光纤之间熔接的单模光纤上镀金制作而成,并且在金属镀膜的一小部分区域涂覆聚二甲基硅氧烷(PDMS)。

基于单模光纤镀金的光纤 SPR 传感器能够在光纤透射光谱中产生两个独立的 SPR 共振峰,进而可实现同时测量液体的折射率和温度。该传感系统结构如图 10 所示,其中一个共振峰是由裸露的镀金光纤部分产生的,它受周围介质的折射率和温度共同调控。而传感区域镀有聚合物的部分会引起另一个共振峰,其专门用于监测液体温度变化而不受外部折射率影响(该共振峰的中心波长为 900 nm)。

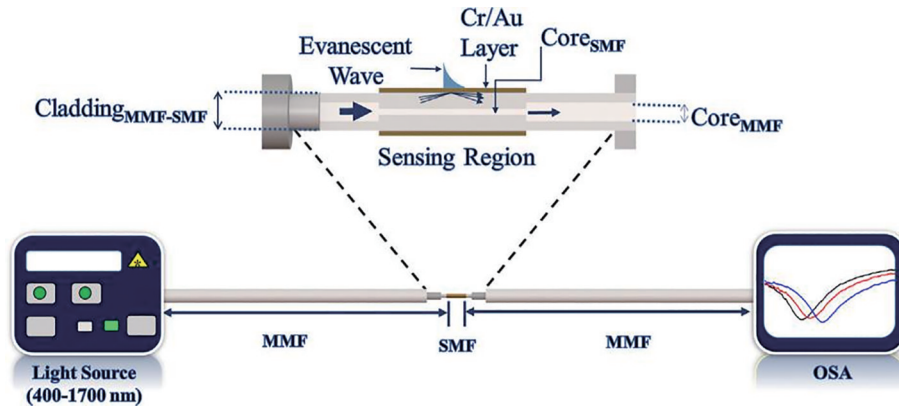


图 10 基于多模-单模-多模结构的传感系统示意图<sup>[39]</sup>

Fig. 10 Sensor system diagram based on multi-mode-single-mode-multi-mode structure<sup>[39]</sup>

2019年,东北大学赵勇课题组<sup>[41]</sup>提出一种基于 SPR 效应且同时测量海水温度、盐度和压力的光纤传感器,结构如图 11 所示。该方案通过在 PCF 光纤表面涂一层金膜来激发表面等离子共振效应,利用单模光纤与 PCF 耦合熔接实现包层模式激励与缓慢扩展,进而为产生多个 SPR 共振峰提供可能。除此之外,该传感器采用两种感光膜(PDMS 和 SU-8)分别涂覆在金膜的不同部位,从而形成 3 个

不同的敏感区域,在传输光谱产生 3 个不同的 SPR 共振峰。通过结构参数优化,该传感器可以实现的盐度、温度和压力的最大灵敏度分别为 0.560 nm/‰、1.802 nm/°C 和 2.838 nm/MPa。最后,通过构建灵敏度矩阵,实现温度、盐度、深度 3 个参量交叉敏感解调。同年,该课题组还开展了基于 C 型微结构光纤光栅测量海水深度和温度的理论分析研究工作<sup>[42]</sup>。

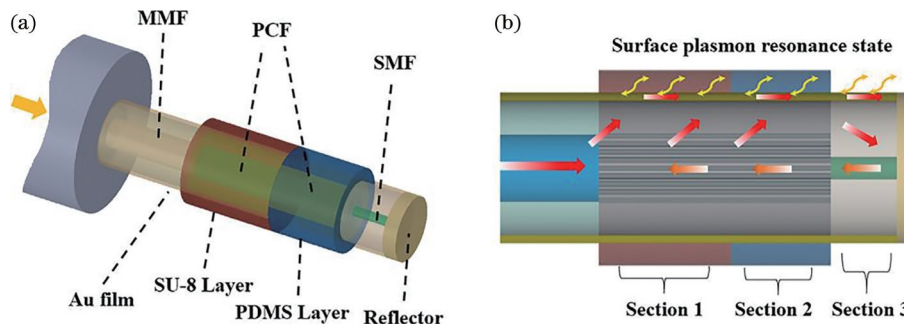


图 11 基于光纤 SPR 的温、盐、深多参量传感探头设计<sup>[41]</sup>。(a)结构图;(b)原理图

Fig. 11 The design of temperature-salinity-depth multi-parameter sensing probe based on fiber SPR<sup>[41]</sup>. (a) Structure diagram; (b) principle diagram

综合对比前几类光纤 CTD 传感器性能可见,光纤 SPR 型传感器普遍具有较高的灵敏度,性能上可以满足海洋环境高精度测试要求。然而,SPR 传感

器通常需要镀上金属膜,这导致 SPR 型传感器在水下长时间工作面临挑战(因海水具有强腐蚀性)。因此,要满足海洋环境的实际应用需求,光纤 SPR

型传感器还需在封装、交叉敏感性解调、环境适应性、集成复用等方面进行大量研究工作。

### 2.6 拉锥光纤型(微纳光纤)

近些年来,以微纳光纤(OM)及微纳光纤耦合器(OMC)为代表的亚波长尺度拉锥光纤,因具有较大比例倏逝场传输特性、强光约束能力、低损耗、小体积、方便与现有光学系统集成等优点,已被广泛用于通信、传感及激光器研制等应用研究领域<sup>[43-44]</sup>。特别是在传感领域,与其他光纤传感器相比,基于拉锥光纤的传感器具有灵敏度高、响应速度快、成本低、制作简单等优点,已被广泛用于温度<sup>[43-45]</sup>、微污染物<sup>[46]</sup>、电流<sup>[47]</sup>、振动<sup>[48]</sup>等物理参量传感研究。基于以上优势,拉锥光纤的应用价值在海洋环境监测领域中也受到广泛关注,近几年已有大量研究成果出现。例如:2014年,中国海洋大学的王晶课题组较早地实现了基于OM结型谐振腔的海水温度传感功能<sup>[49]</sup>;次年,该课题组同样采用OM结型谐振腔,又实现了海水盐度传感功能<sup>[50]</sup>,图12为实验装

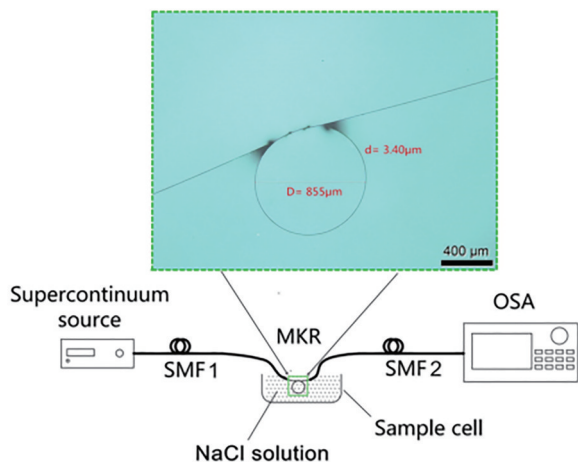


图 12 基于OM结型谐振腔的盐度传感系统示意图<sup>[50]</sup>  
Fig. 12 Schematic of salinity sensing system based on microfiber knot resonator<sup>[50]</sup>

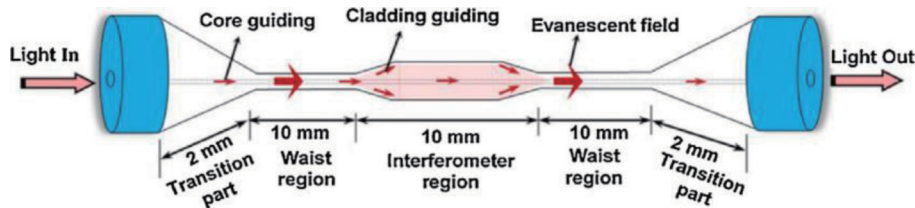


图 14 基于微纳光纤-M-Z干涉仪结构的盐度传感器示意图<sup>[51]</sup>  
Fig. 14 Schematic of the salinity sensor based on the microfiber-M-Z interferometer<sup>[51]</sup>

以上光纤拉锥型CTD传感器主要基于OM研制而成,初步实现了海水温度或盐度等单一参量传感。虽然基于OM的CTD传感器灵敏度较高,但针

置示意图。

2014年,Wu等<sup>[23]</sup>将OM集成到Sagnac干涉仪谐振腔内,并将其作为主要传感单元实现了高灵敏度的盐度传感功能。该传感系统结构如图13所示,其中Sagnac干涉仪主要由一个3 dB耦合器、一小段微纳光纤及偏振控制器(PC,用于调整偏振状态)组成。该传感器主要利用微纳光纤的大比例倏逝场特性(即因部分光场在微纳光纤表面传输,因此对环境折射率变化非常敏感),实现了灵敏度高达1.95 nm/%的盐度传感(跟踪波长在1550 nm附近),盐度监测范围为0~40‰,检测精度达到0.01‰。该传感器具有灵敏度高、尺寸紧凑和易于制造等优点。

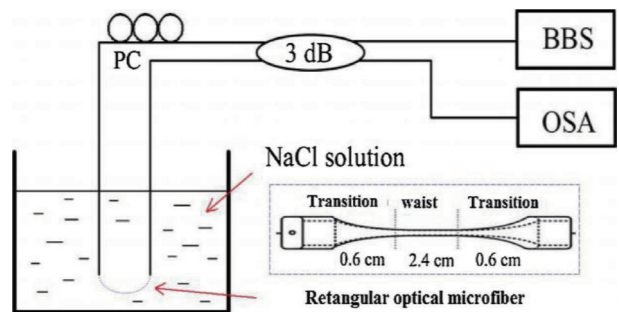


图 13 基于Sagnac干涉仪的盐度测量装置示意图<sup>[23]</sup>  
Fig. 13 Schematic of salinity measurement device based on Sagnac interferometer<sup>[23]</sup>

2016年,Jaddoa等<sup>[51]</sup>采用单模光纤多段结构参数差别化拉锥方法,制作出一种基于OM的在线M-Z干涉仪,并实现了盐度传感功能,其结构示意图见图14。当探测光经单模光纤入射到干涉仪的干涉区域,被分为引导模式和非引导模式,引导模式继续在纤芯中传播,而非引导模式则有部分光场以倏逝场形式在包层和环境介质界面延伸,从而受周围介质折射率调控。

对多参量同步传感与交叉敏感解调问题的研究成果还少有报道,还需要进一步攻关。值得注意的是,相较于OM,OMC不仅具有倏逝场传输特性,且



光传输性能依赖于两耦合波导所传输基模的干涉特性,因此对外界环境变化更为敏感,所得传感器的灵敏度更高。并且,通过特定的结构与封装设计,基于 OMC 的传感器可以实现温度<sup>[52]</sup>、微应力<sup>[53]</sup>、液体折射率<sup>[54-55]</sup>、磁场<sup>[56-57]</sup>等多参量传感研究,这使其在海洋环境多参量传感应用方面展现出更高的潜在应用价值。

2015年中国海洋大学的王晶课题组研制出基于 OMC 的海水温度、盐度双参量传感器<sup>[58]</sup>,实现了灵敏度分别为 930 pm/‰ 和  $-160 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  的盐度和温度传感。该研究所用的 OMC 由两根 OM 搭接而成,通过进一步对双 OM 耦合区涂覆聚酰亚胺,可使温度传感灵敏度提升至  $1.17 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。另外,该研究还对温度和盐度双参量同步传感方法进行了理论分析,即采用传感器灵敏度矩阵进行交叉敏感解调<sup>[45]</sup>。

除了以上研究成果外,国防科技大学的于洋课题组采用拉锥光纤也进行了大量海洋环境监测基础研究,先后研制出基于 OM 和 OMC 的全光相位调制器<sup>[59]</sup>、弱反射器<sup>[60]</sup>、全光强度调制器<sup>[61]</sup>、全光可调谐滤波器<sup>[62]</sup>等功能器件,并成功将所研制的全光相位调制器应用于光纤水听器相位信号载波调制解调中<sup>[63]</sup>。除此之外,该课题组还开展了基于 OM 的分子态污染物监控<sup>[46]</sup>、水吸收特性及水温传感等研究<sup>[64]</sup>。2019年,于洋课题组在未做任何增敏措施的情况下,采用双光纤熔融拉锥的 OMC 开展了海水盐度、温度、压力 3 个参量的传感影响特性研究,实现了灵敏度分别为  $1596 \text{ pm}/\text{‰}$ 、 $2326 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $169 \text{ pm}/\text{MPa}$  的传感响应能力,并提出温度、盐度、深度三参量同步传感解调的实施思路,实验系统如图 15 所示<sup>[65]</sup>。

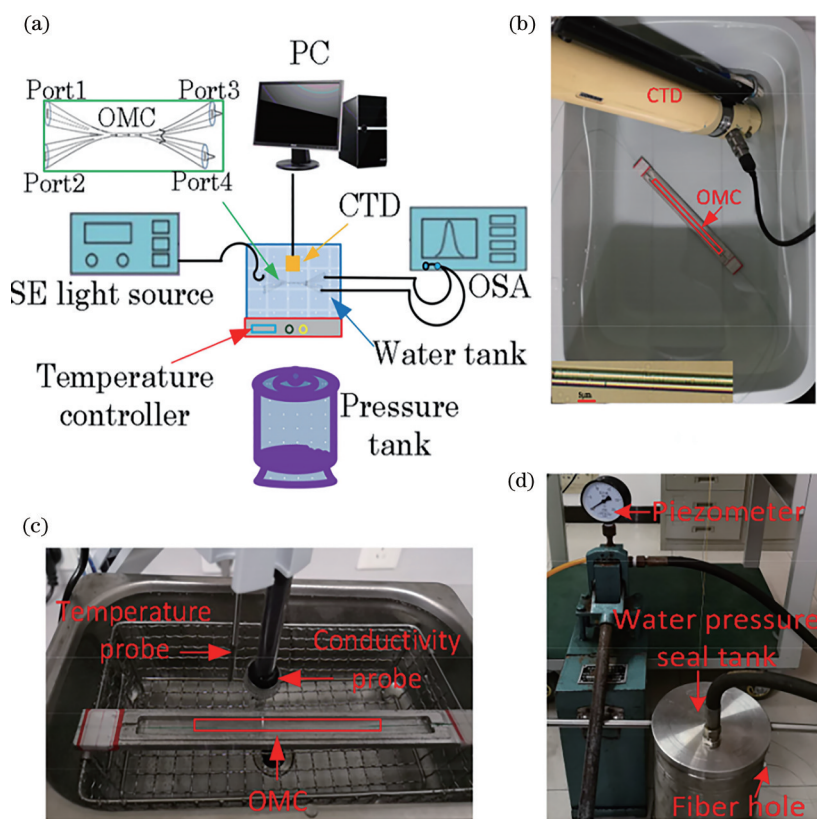


图 15 基于 OMC 的温度、盐度、深度传感实验系统示意图与实物图<sup>[65]</sup>。(a) 温盐深传感实验系统示意图;(b) 盐度测量实验装置和 OMC 样品的光学显微图像(插图);(c) 温度测量实验装置;(d) 深度测量实验装置

Fig. 15 Schematic and physical photo of temperature-, salinity-, and depth-sensing experiment system based on OMC<sup>[65]</sup>. (a) Schematic of the experiment setup for the measurement of salinity, temperature, and depth in seawater; (b) salinity measuring experimental setup and the optical microscopic image of an OMC sample (inset); (c) temperature measuring experimental setup; (d) depth measuring experimental setup

以上基于 OMC 的传感器性能与商用电学 CTD 相当,基本满足全球大部分海域测试需求,为

基于拉锥光纤的 CTD 研制奠定了基础。但是,要满足海洋环境实际监测的应用需求,还需对传感器进

行封装保护与结构优化设计,以解决传感器的复杂环境适应性(如耐压、耐腐蚀等)与多参量交叉敏感解调等关键难题。而 OMC 为四端口光学器件,多余的尾纤与光路成为传感器封装设计的负担。鉴于此,2020 年国防科技大学的于洋课题组将 OMC 的两个输出端口连接在一起,构成基于 OMC-Sagnac 结构的反射型器件,有效提高了器件的紧凑性,并实现了高灵敏度温度、盐度、深度传感功能<sup>[66]</sup>。

为进一步解决传感器交叉敏感问题,2020 年,于洋课题组采用基于 OMC-干涉仪的组合器件进行温度、盐度、深度三参量传感研究<sup>[67-68]</sup>,该传感系统结构示意图见图 16。OMC-干涉仪(OMCI)包含

OMC 腰区和干涉仪传感臂两个传感单元,其中 OMC 腰区可以响应海水温度、盐度、深度 3 个参量(传感参量将调控该组合器件透射谱包络的特征波长变化),而干涉仪传感臂可以响应海水压力和温度 2 个参量(传感参量将调控该组合器件透射谱干涉仪条纹的间距变化)。通过分别跟踪该组合器件的透射谱包络特征波长与干涉仪条纹间距,可分别计算出 CTD 传感器和 TD 传感器的参量。基于此,对 OMCI 的干涉仪部件进行合理的压力或温度增敏,可使该传感器实现参量自校准,进而简化交叉灵敏度矩阵的反演运算,从而提高温度、盐度、深度同步传感精度与解调效率<sup>[67]</sup>。该研究进一步推动了基于 OMC 的海洋 CTD 传感器的实用化研究。

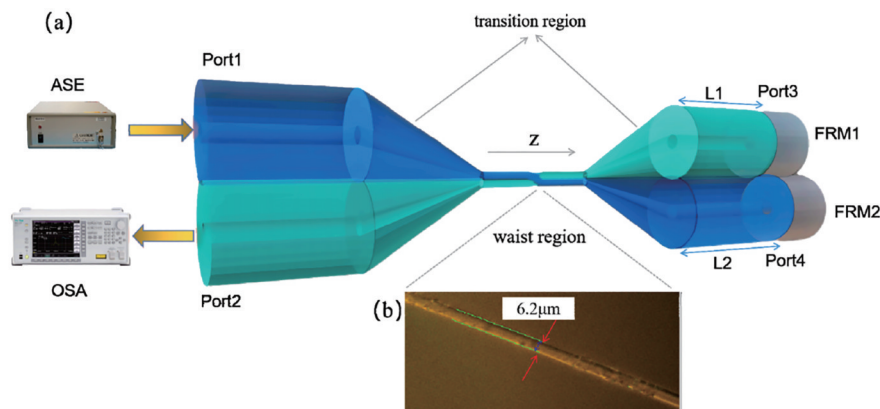


图 16 基于 OMCI 的温度、盐度、深度传感器<sup>[68]</sup>。(a) 结构示意图; (b) 腰区光学显微图

Fig. 16 Temperature-salinity-depth sensor based on OMCI<sup>[68]</sup>. (a) Structural schematic; (b) optical microscopic image of waist region

需要说明的是,要使拉锥光纤型 CTD 满足复杂海洋环境检测需求,并实现三参量同步传感,传感器需要具备更高的稳定性、抗冲击性和抗疲劳性(如耐压、耐腐蚀等),因此还需要进行合理的封装设计。近期,中国海洋大学的王晶课题组利用 PDMS 材料对基于 OM 的 M-Z 干涉仪进行封装,实现了高稳定性和一致性的温度和压力传感功能(TD 传感),传感器灵敏度分别达  $-7.41 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $13.31 \text{ nm}/\text{MPa}$ ,传感器结构示意图与实物照片如图 17 所示<sup>[69]</sup>。通过封装设计,该传感器在实验环境温度下可连续工作一个月以上,这为高环境适应性的光纤 CTD 研制提供了较好的设计思路。

目前所报道的基于 OMC 的各型海洋环境参量光纤传感器,大多通过测试海洋环境参量变化引起的光纤波导及增敏介质折射率(RI)变化量来实现相应传感功能,并通过基于波长跟踪技术的光谱分析法实现解调,故方便多参量传感器信号一体化解

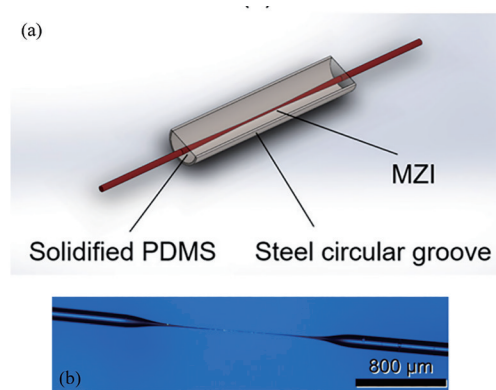


图 17 基于 PDMS 封装微纳光纤 M-Z 干涉仪的温压传感器结构<sup>[69]</sup>。(a) 示意图; (b) 实物图

Fig. 17 Temperature and pressure sensor structure based on PDMS encapsulated micro-nano fiber M-Z interferometer<sup>[69]</sup>. (a) Schematic; (b) physical image

调。相比于微纳光纤环/结型谐振腔、光纤光栅、光纤 F-P 腔等类型的光纤 CTD 传感器,基于 OMC 的

传感器灵敏度可高出 5~40 倍;并且,采用双光纤熔融拉锥而成的 OMC 具备多端口光传输功能,方便复用集成。

### 3 光纤 CTD 传感阵列

为满足大面积海洋基础数据获取与实时精确预报需求,如获得中尺度海洋环流、内波、海洋跃层等数据,还需开发便于大规模成阵布放的海洋环境参量监测技术与装备。随着单个光纤 CTD 传感器研制技术的日趋成熟,光纤 CTD 阵列的研究与工程应用也逐渐涌现。例如:2017 年,武汉理工大学的 Bai 等<sup>[70]</sup>采用超弱 FBG(UFBG)传感阵列,通过涂覆不同的敏感材料(聚酰亚胺、Pd/Ni 等),开展了温度、盐度、湿度等多参数传感研究,图 18 所示为 UFBG 涂覆型传感器结构及实物照片。虽然该系统各参量传感灵敏度和监测精度不高,但该研究成果为海洋环境多物理参量阵列化传感研究提供了较好的研究思路。同年,日本德岛大学的 Kishikawa 等<sup>[71]</sup>采用基于 FBG 线性腔激光准阵列光纤传感系统,开展了多点水域的温度传感研究。意大利 TeCIP 研究所的 Muanenda 等<sup>[72]</sup>采用 FBG 阵列对液面附近的温度场分布进行测试研究。2018 年,智利天主教教皇大学的 Sarabia 等<sup>[73]</sup>将光纤分布式温度传感技术用于盐梯度太阳池(SGSP)中非对流区的侵蚀研究,该阵列将 14 个空间离散点温度标记用于测试实验室规模的 SGSP 中的温度分布情况,但目前还处于浅层水体温度分布实验研究阶段。另外,中国科学院半导体研究所李芳课题组采用基于光纤光栅的温深阵列,进行了中尺度海洋内波工程测

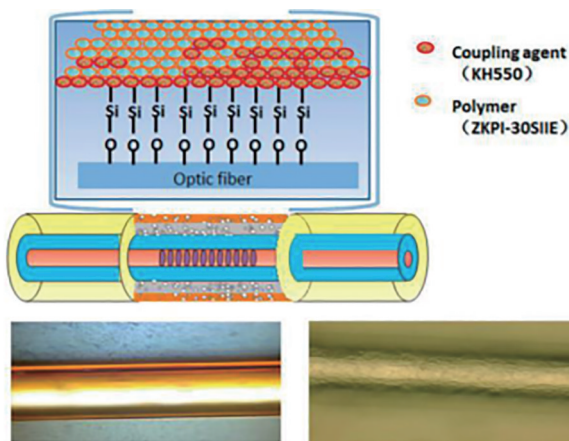


图 18 UFBG 涂覆型温盐传感器结构及实物照片<sup>[70]</sup>

Fig. 18 Structure and physical photos of UFBG coated temperature and salinity sensor<sup>[70]</sup>

试研究<sup>[74]</sup>。从以上公开出版的文献来看,基于光纤的 CTD 及其他海洋物理参量的传感阵列实用化研究成果还较少,还需进一步开展相关技术的攻关研究工作。

### 4 总结与展望

以上各型光纤 CTD 传感器的温度、盐度、深度的灵敏度基本在 10~7410 pm/°C、20~1950 pm/‰、2.8 pm/MPa~30 nm/MPa 范围内。综合对比各型传感器的基础性能,发现光纤光栅型 CTD 传感器虽然灵敏度相对较低,但稳定性和环境适应性较强,已逐渐被应用于海洋环境监测工程实践中。并且,由于光纤光栅型传感器便于大规模集成复用,因此其在海洋环境参量传感阵列化研究方面具有重要应用价值,也是目前行之有效的技术路径。而通过引入适当的材料镀膜增敏技术,光纤光栅型 CTD 传感器性能有望进一步提升,以满足高分辨率海洋环境监测需求。另外,光纤 SPR 型 CTD 和拉锥光纤型 CTD 的灵敏度较高,已基本达到商用化电学 CTD 的性能水平,可满足全球大面积海域测试的基本需求。但受限于环境适应性与抗疲劳性等,光纤 SPR 型 CTD 通过合理的封装设计有望作为投弃式 CTD 应用于海洋环境监测,但必须进一步解决交叉敏感问题,实现多参量协同敏感功能,并大幅降低成本。而随着封装技术的日趋完善,拉锥光纤型 CTD 的环境适应性能逐步得到提升,并且其在海洋环境多参量一体化监测方面具有较高的应用潜力。

从以“海洋物联网”为代表的新一代海洋监测网络建设实践和发展趋势来看,以挂载有多种传感器的潜/浮标系统等为代表的小型化海上自主监测平台在水下、海气界面快速机动组网等“海洋物联网”建设方面展现出巨大优势。但受到各型海上自主监测平台的载荷、供电、抗腐蚀等自持能力限制,其所挂载的海洋环境监测系统必须具备数据兼容性强、成本低廉、结构紧凑、功耗低、多种环境参量同步高精度原位监测能力、自主信号处理与分发等性能优势。另外,从大面积海洋基础环境数据监测实际需求来看,还需研制便于大规模成阵布放的海洋环境参量监测系统及装备。综合以上海洋环境监测技术需求,光纤传感技术在海洋环境监测中的应用研究需从以下两个方面着手:一是大力开发灵敏度高、动态范围大、复杂环境适应性强(如耐压、耐腐蚀、抗泥沙及海藻污染等)、便于多参量一体化

传感与信号解调的新型光纤传感器与保障技术;二是研发便于多参量、且可大规模阵列集成的光纤传感技术。

总之,虽然光纤传感技术在海洋环境监测应用中已取得了一定研究进展,并展现出较高的应用价值和较大的技术优势,但要全方面满足未来海洋监测网络建设需求,还需进一步技术攻关,如解决传感器在多参量交叉敏感解调(现有光纤传感器多存在交叉敏感问题)、环境适应性、成阵集成、信号复用解调等方面存在的难点问题。

### 参 考 文 献

- [1] Fofonoff N P. Physical properties of seawater: a new salinity scale and equation of state for seawater[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1985, 90(C2): 3332-3342.
- [2] Diaz-Herrera N, Esteban O, Navarrete M C, et al. *In situ* salinity measurements in seawater with a fibre-optic probe[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(8): 2227-2232.
- [3] Saucan A A, Win M Z. Information-seeking sensor selection for ocean-of-things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10072-10088.
- [4] Li X G, Zhou X, Zhao Y, et al. Multi-modes interferometer for magnetic field and temperature measurement using photonic crystal fiber filled with magnetic fluid[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 41: 1-6.
- [5] Li C, Ning T G, Wen X D, et al. Magnetic field and temperature sensor based on a no-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 72: 104-107.
- [6] Bian C, Wang J, Bai X H, et al. Optical fiber based on humidity sensor with improved sensitivity for monitoring applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106342.
- [7] Fadeev K M, Larionov D D, Zhikina L A, et al. A fiber-optic sensor for simultaneous temperature and pressure measurements based on a Fabry-Perot interferometer and a fiber Bragg grating[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2020, 63(4): 543-546.
- [8] Qian Y, Zhao Y, Wu Q L, et al. Review of salinity measurement technology based on optical fiber sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2018, 260: 86-105.
- [9] McNeil G T. Metrical fundamentals of underwater lens system[J]. *Optical Engineering*, 1977, 16(2): 162128.
- [10] Minato H, Kakui Y, Nishimoto A, et al. Remote refractive index difference meter for salinity sensor[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1989, 38(2): 608-612.
- [11] Shen F C, Zhou K M, Gordon N, et al. Compact eccentric long period grating with improved sensitivity in low refractive index region[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15729-15736.
- [12] Cong J, Zhang X M, Chen K S, et al. Fiber optic Bragg grating sensor based on hydrogels for measuring salinity[J]. *Sensors and Actuators B*, 2002, 87(3): 487-490.
- [13] Liu X M, Zhang X M, Cong J, et al. Demonstration of etched cladding fiber Bragg grating-based sensors with hydrogel coating[J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 96(1/2): 468-472.
- [14] 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.
- [15] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(4): 398-399.
- [16] Peng G D, Xiong Z, Chu P L. Photosensitivity and gratings in dye-doped polymer optical fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 1999, 5(2): 242-251.
- [17] Bhowmik K, Peng G D, Ambikairajah E, et al. High sensitivity polymer fibre Bragg grating sensors and devices[M]//Serpe M J, Kang Y, Zhang Q M. Photonic materials for sensing, biosensing and display devices. Springer series in materials science. Cham: Springer, 2015, 229: 289-314.
- [18] Sun B, Wang Y P, Qu J L, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 1906-1911.
- [19] Zhang J, Qiao X G, Guo T, et al. Highly sensitive temperature sensor using PANDA fiber Sagnac interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(24): 3640-3644.
- [20] Silva S, Pachon E, Franco M, et al. Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3236-3242.
- [21] 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.
- [22] Wu C, Guan B O, Chao L, et al. Salinity sensor based on polyimide-coated photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20003-20008.
- [23] Wu C, Sun L P, Li J, et al. Highly sensitive evanescent-wave water salinity sensor realized with rectangular optical microfiber Sagnac interferometer [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 915758.
- [24] Xu Y P, Lu P, Qin Z G, et al. Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3031-3042.
- [25] Wu Y, Xu Y, Yang Y G, et al. High-sensitivity pressure sensor based on fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(10): 105102.
- [26] Choi S, Kim J, Lee S L, et al. Simultaneous measurement of liquid level and temperature using in-fiber grating-based Mach-Zehnder interferometer and faraday rotator mirror[J]. Journal of Nanoscience Nanotechnology, 2021, 21(3): 2024-2031.
- [27] Tong Z R, Huang Y L, Yang S Q, et al. Sensitive current sensing base on all-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4920: 487-491.
- [28] Zhang Y D, Wang K Y, Wang H P, et al. Mach-Zehnder interferometer as a temperature sensor based on the nested fiber ring resonator[C]//2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), December 3-5, 2013, Wellington, New Zealand. New York: IEEE Press, 2013: 226-229.
- [29] Guzman-Sepulveda J R, Torres-Cisneros M, May-Arrijoja D A. Salinity sensor based on a two-core fiber [C]//Latin America Optics and Photonics Conference 2012, November 10-13, 2012, Sao Sebastiao, Brazil. Washington, D.C.: OSA, 2012: LS3B. 3.
- [30] Meng Q Q, Dong X Y, Ni K, et al. Optical fiber laser salinity sensor based on multimode interference effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(6): 1813-1816.
- [31] Yu C P, Liou J H. Selectively liquid-filled photonic crystal fibers for optical devices[J]. Optics Express, 2009, 17(11): 8729-8734.
- [32] Xiao L M, Jin W, Demokan M S, et al. Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer[J]. Optics Express, 2005, 13(22): 9014-9022.
- [33] Vigneswaran D, Ayyanar N, Sharma M, et al. Salinity sensor using photonic crystal fiber[J]. Sensors and Actuators A, 2018, 269: 22-28.
- [34] Sharma A K, Jha R, Gupta B D. Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(8): 1118-1129.
- [35] Zhao Y, Lei M, Liu S X, et al. Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements [J]. Sensors and Actuators B, 2018, 261: 226-232.
- [36] Zheng W L, Shi B F, Li X G, et al. Optical fiber SPR sensor for highly-sensitive detection of cholesterol concentration[C]//2020 IEEE 5th Optoelectronics Global Conference (OGC), September 7-11, 2020, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2020: 134-136.
- [37] Semwal V, Gupta B D. Highly selective SPR based fiber optic sensor for the detection of hydrogen peroxide[J]. Sensors and Actuators B, 2021, 329: 129062.
- [38] Esteban Ó, Cruz-Navarrete M, González-Cano A, et al. Measurement of the degree of salinity of water with a fiber-optic sensor[J]. Applied Optics, 1999, 38(25): 5267-5271.
- [39] Velázquez-González J S, Monzón-Hernández D, Martínez-Piñón F, et al. Highly sensitive surface plasmon resonance-based optical fiber multi-parameter sensor[J]. Procedia Engineering, 2016, 168: 1249-1252.
- [40] Velázquez-González J S, Monzón-Hernández D, Moreno-Hernández D, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor[J]. Sensors and Actuators B, 2017, 242: 912-920.
- [41] 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.
- [42] Wu Q L, Zhao Y, Zhang Y N, et al. Theoretical analysis of seawater depth and temperature measurement with C-type micro-structured fiber grating[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 133-140.
- [43] Jung Y, Brambilla G, Richardson D J. Optical microfiber coupler for broadband single-mode operation[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5273-5278.

- [44] Ahmad H, Jasim A A. Fabrication and characterization of  $2 \times 2$  microfiber coupler for generating two output stable multiwavelength fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(19): 4227-4233.
- [45] Wang S S, Yang H J, Liao Y P, et al. High-sensitivity salinity and temperature sensing in seawater based on a microfiber directional coupler[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 1-9.
- [46] Wei Z T. The evanescence character of optical microfiber and research on micropollutant detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 67-70.  
卫正统. 微纳光纤倏逝场特性及微污染传感技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 67-70.
- [47] Lim K S, Harun S W, Damanhuri S S A, et al. Current sensor based on microfiber knot resonator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2011, 167(1): 60-62.
- [48] Yu Y, Zhang X L, Song Z Q, et al. Investigation of fabrication and vibration sensing properties of optical microfiber coupler[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1105002.  
于洋, 张学亮, 宋章启, 等. 微光纤耦合器制作及振动传感特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105002.
- [49] Yang H J, Wang S S, Wang X, et al. Temperature sensing in seawater based on microfiber knot resonator[J]. *Sensors (Basel)*, 2014, 14(10): 18515-18525.
- [50] Liao Y P, Wang J, Yang H J, et al. Salinity sensing based on microfiber knot resonator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2015, 233: 22-25.
- [51] Jaddoa M F, Jasim A A, Razak M Z A, et al. Highly responsive NaCl detector based on inline microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensors and Actuators A*, 2016, 237: 56-61.
- [52] Ding M, Wang P F, Brambilla G. A microfiber coupler tip thermometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5402-5408.
- [53] Qi K Y, Zhang Y D, Sun J F, et al. Highly sensitive strain sensor based on a sealed optical microfiber coupler[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 59: 102313.
- [54] Zhang J L, Shi L, Zhu S, et al. Modeling of a single-notch microfiber coupler for high-sensitivity and low detection-limit refractive index sensing[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 672.
- [55] Zhang Q, Lei J C, Cheng B K, et al. A microfiber half coupler for refractive index sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(18): 1525-1528.
- [56] Wei F F, Mallik A K, Liu D J, et al. Magnetic field sensor based on a combination of a microfiber coupler covered with magnetic fluid and a Sagnac loop[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4725.
- [57] Luo L F, Pu S L, Tang J L, et al. Highly sensitive magnetic field sensor based on microfiber coupler with magnetic fluid[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(19): 193507.
- [58] 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*, 2015, 54(34): 10283.
- [59] Yu Y, Bian Q, Guo K, et al. Experimental investigation on the characteristics of all-optical modulation of optical microfiber coupler[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 1-10.
- [60] Yu Y, Zhang X L, Song Z Q, et al. An investigation on optical microfiber reflector with low reflectance[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1): 012301.
- [61] Yu Y, Bian Q, Zhang N, et al. Investigation on an all-optical intensity modulator based on an optical microfiber coupler[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(4): 040605.
- [62] Yu Y, Bian Q, Wang J F, et al. All-optical modulation characteristics of a microfiber coupler combined Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-11.
- [63] Yu Y, Zhang X L, Sun S L, et al. Study on PGC demodulation system based on all-optical microfiber phase modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0710002.  
于洋, 张学亮, 孙世林, 等. 基于微纳光纤全光相位调制器的PGC解调系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0710002.
- [64] Wei Z T, Song Z Q, Zhang X L, et al. Miniature temperature sensor based on optical microfiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(11): 110602.
- [65] 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 Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2739-2747.
- [66] Cao L, Yu Y, Xiao M, et al. High sensitivity conductivity-temperature-depth sensing based on an optical microfiber coupler combined fiber loop[J].

- Chinese Optics Letters, 2020, 18(1): 011202.
- [67] Zhou L J, Yu Y, Cao L, et al. Fabrication and characterization of seawater temperature sensor with self-calibration based on optical microfiber coupler interferometer[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 6018.
- [68] Zhou L J, Yu Y, Huang H M, et al. Salinity sensing characteristics based on optical microfiber coupler interferometer[J]. Photonics, 2020, 7(3): 77.
- [69] Hou Y F, Wang J, Wang X, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature in seawater with PDMS sealed microfiber Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(22): 6412-6421.
- [70] Bai W, Yang M H, Hu C Y, et al. Ultra-weak fiber Bragg grating sensing network coated with sensitive material for multi-parameter measurements[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1509.
- [71] Kishikawa H, Okada M, Takahashi K, et al. Multi-point temperature sensing using a linear-cavity lasing system[J]. Applied Optics, 2017, 56(11): 3206-3212.
- [72] Muanenda Y, Taki M, Toccafondo I, et al. Cyclic pulse coding for hybrid fast BOTDA/Raman sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91575L.
- [73] Sarabia A, Meza F, Suárez F. Use of fiber-optic distributed temperature sensing to investigate erosion of the non-convective zone in salt-gradient solar ponds [J]. Solar Energy, 2018, 170: 499-509.
- [74] Wang L, Wang Y J, Wang J F, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth[J]. Photonic Sensors, 2020, 10(1): 57-66.