

激光与光电子学进展

光纤传感技术在物理海洋观测领域的应用研究

王力^{1,2}, 王永杰¹, 于非^{3**}, 李芳^{1,2*}

¹中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

³中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071

摘要 光纤传感器以其尺寸小、易于组网、本征抗电磁干扰等优势,有望在海洋观测领域成为一种辅助的测量手段。近年来围绕着物理海洋观测领域的光纤传感技术研究受到了科研人员的广泛关注。本文按测量对象和测量原理分类,着重介绍了基于光纤光栅的海水温度传感器、海水盐度传感器和海水压力传感器,基于多芯光纤的海水盐度传感器,基于 Michelson 和 Mach-Zehnder 干涉式的海水盐度传感器,基于 F-P 腔的海水压力传感器,基于谐振、耦合技术的新型光纤海洋温盐深传感器,以及基于热耗散和湍动能耗散两种原理的光纤湍流传感器;分析了各种传感器的测量方法与实验结果,并指出技术上的优缺点。最后,展望了光纤传感器在物理海洋观测领域的发展前景。

关键词 光纤光学; 温度; 盐度; 压力; 深度; 湍流; 光纤传感

中图分类号 P716+.42

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306014

Application of Optical Fiber Sensing Technology in the Field of Physical Ocean Observation

Wang Li^{1,2}, Wang Yongjie¹, Yu Fei^{3**}, Li Fang^{1,2*}

¹Laboratory of Optoelectronic System, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract Fiber optic sensors are expected to become an auxiliary measurement method in the field of ocean observation due to their small size, easy networking, and intrinsic resistance to electromagnetic interference. Recently, the research of optical fiber sensing technology in the field of physical ocean observation has received broad attention from scientific researchers. According to the different classifications of measurement objects and principles, this article focuses on the seawater temperature, salinity, and pressure sensors based on fiber grating, the seawater salinity sensor based on multi-core fiber, and the interferometer based on Michelson and Mach-Zehnder. Seawater salinity and pressure sensors based on Fabry-Perot cavity, new optical fiber ocean temperature and salt depth sensor based on resonance and coupling technology, and fiber optic turbulence sensor based on two principles of heat and turbulent energy dissipation. This article analyzes the measurement methods and experimental results of various sensors and highlights the technical advantages and disadvantages. Finally, the development of optical fiber sensors in the field of physical ocean observation has prospects.

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-05-14; 录用日期: 2021-05-19

通信作者: *lifang@semi.ac.cn; **yuf@qdio.ac.cn

Key words fiber optics; temperature; salinity; pressure; depth; turbulence; fiber optic sensing

OCIS codes 060.2370; 060.2280; 060.2300

1 引言

地球表面的 70.8% 被海水覆盖,但目前人类对海洋的认知度低于 5%。2001 年 5 月,联合国缔约国文件指出:“21 世纪是海洋世纪”。海洋本就是人类赖以生存的空间,我们的生活离不开海洋。海洋中丰富的矿产、生物资源,是支持人类持续发展的宝贵财富。海洋科学研究的进展,对当今人类所面临的极端气候、全球变暖、物种起源等重大科学问题的解决都有着重要意义。

海洋可以被称为气候系统的“记忆”,因为它储存的热量是大气的 1000 倍,碳的储存量是大气的 10 倍。据统计,1973—2013 年海洋累计吸收了地球气候系统约 93% 的热能^[1]。因此,了解海洋吸收热量的方式以及存储方式,对于了解随着温室气体浓度升高的地球变暖速度至关重要。海洋在许多方面与人类的生计息息相关,除海洋对气候有调节作用外,海洋还提供了各种各样的社会、文化、资源和环境效益。

人类理解海洋规律、利用海洋规律去造福人类,主要依靠的手段是海洋环境监测和海洋调查。海洋环境监测和海洋调查可以帮助人类更好地理解海洋气候^[2]和生态系统以及人类对海洋生态环境的影响,如气候变暖导致陆地和海洋的冰融化^[3],二氧化碳吸收量的增加导致海洋酸化。两者都在以惊人的速度发展。深海和偏远海区的持续有效观测甚至可以为准确模拟全球气候变化、减缓气候变化的影响提供数据支撑和指导。

此外,开展海洋科学研究有助于人类了解地球的能量传输方向与耗散途径,帮助人类解决 21 世纪最具挑战的部分基本科学问题,如与生命起源和地球能量流动相关的基本科学问题、洋底沉积物扩散以及生态过程演化的认识等科学问题,同时海洋科学研究也是国家海洋强国战略和资源开发的重要手段。

实时观测数据匮乏,尤其是大尺度的、实时或准实时的、深海资料的短缺,一直制约着海洋科学研究的发展。1998 年,美国和日本等国家的大气、海洋科学家提出了全球海洋环境观测项目——ARGO (Array for Real-Time Geostrophic Oceanography) 计

划,为海洋环境观测领域开启了新的纪元。ARGO 计划通过在海洋上投放足够多的、性价比高的、卫星可跟踪的自动探测浮标,构成一个海洋观测网。ARGO 计划的推出,迅速得到了 10 余个国家的响应和支持,其中包括澳大利亚、加拿大、法国、德国、日本、韩国等,我国已于 2002 年正式宣布参加国际 ARGO 计划的组织实施。经过世界各国近 20 年的共同努力,现在已经建成一个由 3000 个 ARGO 剖面浮标组成的全球 ARGO 海洋观测网,能够持续获取全球深海大洋上 2000 m 深度内的海水温盐深流等监测资料,并免费提供给世界各国科学家研究和应用。此外,世界各个海洋强国的海洋观测计划也都对海洋物理温盐深流展开了积极的观测,如:美国的 OOI^[4]、MARS^[5]、DOOS^[6-7];加拿大的 ONC^[8]、NEPTUNE^[9]、VENUS^[10];欧洲的 ESONET^[11-12]、EMSO^[13];日本的 ARENA^[14-15]、JAMSTEC^[16]。

海洋观测技术的进步推动着海洋科学的发展,海洋观测能力也是一个国家综合国力的重要体现。从各个国家和地区的重点海洋观测计划中不难发现,对海洋温度、盐度、压力以及各种尺度流浪潮的观测是不可或缺的观测内容。

对海洋温度、盐度、深度的观测是海洋调查的最基本内容之一,海洋的温盐深数据不仅可以为生物地球化学和海洋生态系统提供背景物理参数^[17-19],还可以为其他海洋传感器和海洋声学传播的计算提供必要的补偿参数。例如,海洋中的声速随着海水的温度、盐度、压力的增大而增大^[20]。虽然声速的数值变化量很小,但是这个变化对长距离传播声线的分布、射程、传播时间等参量的影响会很大,一般需要准确的声速数值^[21]。正是这个原因,海洋的温度信息、深度信息和盐度(电导率)信息也是海洋监测的重要内容^[22]。近年来,在海洋温盐深传感器的研发方面,科学家也取得了不少进展。本文按测量对象和测量原理分类,着重介绍了基于光纤光栅的海水温度传感器、海水盐度传感器和海水压力传感器,基于多芯光纤的海水盐度传感器,基于 Michelson 和 Mach-Zehnder 干涉式的海水盐度传感器,基于法布里-珀罗(F-P)腔的海水压力传感器,基于谐振、耦合技术的新型光纤海洋温盐深传感器,以及基于热耗散和湍动能耗散两种原理的光纤湍流传感器。

2 光纤温盐深类传感器研究进展

电子型温盐深仪(CTD)系统具有精度高、实用性广等优点,目前在行业中依然属于主要的观测工具。但在某些方面依然存在一些不足,如系统价格通常较高、体积大、易受电磁干扰,不适用于对海水的表面和微纳尺度进行检测^[23]。此外,为了获得一定深度的海洋盐度和温度数据,需要在海试中使用串联 CTD,这大大提高了成本。因此,光纤传感器因其结构紧凑、灵敏度高、耐高温、复用方便、可现场测量和抗外部电磁干扰等特点,成为电子型 CTD 的补充测量手段而受到越来越多的关注。

电子 CTD 测量盐度的原理是测量海水的电导率。目前通用的标准是 1978 年公布的《1978 年实用盐标》^[24],其改善了以前的标度方法中存在的只适用于海水成分不变的情况,以及精确度不高等问

题。实用盐标表达式为

$$S = \sum_{i=0}^5 a_i K_{15}^{\frac{i}{2}}, \quad (1)$$

式中: $a^0 \sim a^5$ 为系数,分别为 -0.08996 、 28.29720 、 12.80832 、 -10.67869 、 5.98624 、 -1.32311 ; K_{15} 为当温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在一个标准大气压下,海水样品与标准 KCl 溶液的电导率比值。

光纤传感测量盐度一般是基于折射率进行测量。随着海水盐度的改变,其光学折射率也发生单调变化,并且在一定温度条件下两者存在线性对应关系。因此,通过测量海水折射率来间接检测海水盐度是一种可行的技术方案。自从 1967 年 Rusby^[25]基于少量的几个样品,拟合了海水折射率与盐度的变化,关于海水盐度(S)和光学折射率(n)的研究屡见报道,也出现了大量经验公式。

1977 年 McNeil^[26]得到了海水折射率的经验方程式

$$n(S, T, \lambda) = 1.3247 - 2.5 \times 10^{-6} T^2 + S(2 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-7} T) + \frac{3300}{\lambda^2} - \frac{3.2 \times 10^7}{\lambda^4}, \quad (2)$$

式中: n 为折射率; T 为温度; λ 为波长。1995 年 Quan 等^[27]也得出了类似的经验公式

$$n(S, T, \lambda) = n_0 + (n_1 + n_2 T + n_3 T^2) S + n_4 T^2 + \frac{n_5 + n_6 S + n_7 T}{\lambda} + \frac{n_8}{\lambda^2} + \frac{n_9}{\lambda^3}, \quad (3)$$

式中: $n_0 = 1.31405$, $n_1 = 1.779 \times 10^{-4}$, $n_2 = -1.05 \times 10^{-6}$, $n_3 = 1.6 \times 10^{-8}$, $n_4 = -2.02 \times 10^{-6}$, $n_5 = 15.868$, $n_6 = 0.01155$, $n_7 = -0.00423$, $n_8 = -4382$, $n_9 = 1.1455 \times 10^6$ 。但上述经验方程式中都没有引入压强(P),本研究认为这是一种缺憾。

目前,对海水盐度的光学测量手段还存在一定的局限性。首先是测量设备特别是光源和结构的限制,一般都是金属或者稀有气体的光谱线,局限在可见光范围内;其次是测试标定用的标准海水的选择不统一且缺乏相对一致的参考,导致光学测量的通用性没有电导率高,且系统复杂、价格高昂。因此,光学类盐度光感器始终处在一个相对辅助的地位。此外,海水与其他物质一样是具有色散特性的。通过文献调研得知,在可见光波段 300 nm 的波长差引起的折射率差为 -0.013 ,其绝对值是 43% 盐度引起折射率差 0.009 的 1.44 倍,即忽略色散效应通过折射率测量得到的盐度是不精确的。另外,由于压强也是折射率的重要影响因素,如:在可见光波段 100 MPa 压强引起的折射率变化约为 0.015,是 43% 盐度引起的折射率差 0.009 的 1.67 倍。因此,海洋盐度测量需要采用原位测量,且在

计算公式中引入实时测量压强。

目前,国内外文献报道中的基于各种光纤传感原理和结构的 CTD 传感器被多次提出,主要包括传统的短周期光纤布拉格光栅(FBG)、长周期光纤光栅(LPG)、多芯光纤、基于 Michelson 和 Mach-Zehnder 干涉式、光纤 F-P 腔干涉式、超细纤维结/线圈谐振器、高双折射椭圆光纤 Sagnac 环、光学微纤维耦合器等。这些传感器各有优缺点,下面将选取一些典型文献对它们进行逐一介绍。

2.1 基于光纤光栅的海水温盐深传感器

2005 年,法国科学家在 Europe Oceans 上报道了一种采用 FBG 和 LPG 混合集成的温盐传感器^[28],两者协同工作,并提出如图 1 所示的 48 元观测阵列,但 FBG 的温度灵敏度仅为 $51\text{ pm}/^\circ\text{C}$,LPG 的盐度灵敏度为 $4.6\text{ pm}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$,根据 GB/T 23246—2009《电导率温度深度剖面仪》中的 CTD 分级标准,该传感器只达到二级标准,但是它充分展现了光纤光栅传感器便于组网式测量的优势。

2006 年,华北水利水电大学开展了 FBG 测温研究,并于 2009 年在南海进行了海试比测^[29]。实验结果显示,FBG 的固有温度灵敏度低,比测结果显示的

系统精度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 远大于物理海洋观测所需要的精度 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但是该系统具有长期无零漂的优势。相比于电子类传感器, 这种传感器可以应用于腐蚀性或电磁干扰的环境中, 预计会有更长的工作寿命。

2014 年, 印度理工学院设计了一款基于 FBG 并集成了薄金属膜片的高灵敏度压力传感器, 其原理如图 1(a) 所示, 传感探头照片见图 1(b)^[30]。他们在理论和实验上进行了研究, 结果发现: 在压力作用下, 膜片挠曲会导致沿 FBG 长度方向拉伸应变;

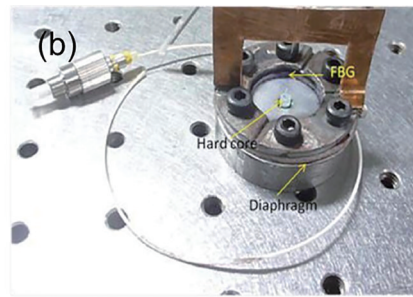
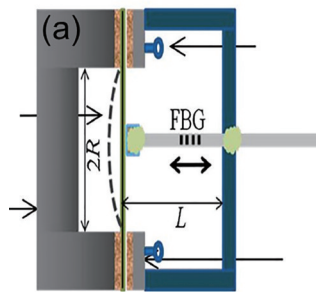


图 1 传感器结构示意图和实物照片^[30]。(a) 传感器结构示意图; (b) 传感器头照片

Fig. 1 Schematic of sensor structure and photos^[30]. (a) Schematic of sensor structure; (b) photo of the sensor head

2013—2018 年, 在中科院先导专项的支持下, 中科院半导体研究所李芳团队自主研发了基于短周期光纤光栅的温深传感器阵列(深度传感器即压力传感器), 在 630 m 长的拖曳链上集成了 120 个温深传感器, 在船舶运行时对海洋的温深剖面进行高分辨率测试, 突破了之前大面观测的低水平分辨率限制, 极大提升了海洋调查的效率和数据的丰度, 是冷水团等海洋现象观测装备的一次质的飞跃, 推动了光纤传感技术在海洋技术领域的应用研究^[31]。

2016 年、2017 年中科院半导体研究所先后在北

从测试结果中获得的传感器压力灵敏度比裸 FBG 可以测量的灵敏度高大约 4 个数量级。

这种膜片式封装的压力传感器的优点是通过对机械结构和材料组分的设计, 可以达到比较高的灵敏度, 但是对机械加工要求比较高。此外, 膜片与光纤结合处需要施加预应力, 这对传感器的长期稳定性也是一种考验。理论上, 这种传感器较电子类传感器可以适应更加恶劣的电磁干扰环境。

黄海冷水团断面、南海东沙群岛附近开展了 3 次海试应用^[31], 这也是首次精确绘制各水域温深剖面特征, 并捕捉到以往未观测到的冷水团锋面和亚中尺度过程的精确温深剖面, 为海洋科学家的科学研究提供了装备支撑。图 2 分别展示了 630 m 拖曳链系统示意图、绞车及排缆器和拖曳中的温深链。图 3 分别展示了 2017 年 7 月南海东沙群岛拖曳链和传统站位观测海试结果的对比图。图 4 展示了 2017 年 10 月北黄海海试冷水团全海深温度剖面, 这也是首次获得的该区域高空间分辨率的温深剖面。



图 2 温深链设备^[31]。(a) 630 m 拖曳链系统示意图; (b) 绞车及排缆器; (c) 拖曳中的温深链

Fig. 2 Warm deep chain equipment^[31]. (a) Diagram of 630 m towing chain system; (b) winches and streamers; (c) warm deep

在长周期光纤光栅方面, 2016 年东北大学用光子晶体光纤制作了长周期光栅, 并测量了折射率^[32]。在 $1.33\sim 1.34$ 折射率范围内灵敏度可达 $2343\text{ nm}/\text{RIU}$, 分辨率为 $8.5\times 10^{-6}\text{ RIU}$, 属于目前使用的长周期光纤光栅方案中能够达到的最高灵敏度, 如图 5 所示^[32]。

2017 年, 北京信息科技大学祝连庆教授团队采用飞秒激光器制作长周期光栅的方式研制折射率传感器, 灵敏度达到 $332\text{ nm}/\text{RIU}$ ^[33]。同年, 印度技术学院用特种光纤 PS-1250/1500 制作的两个长周期光栅, 也得到了高灵敏度的折射率传感器, 如图 6 所示^[34]。

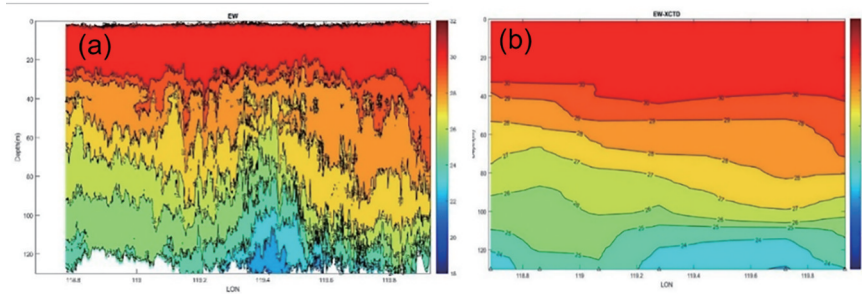


图 3 2017 年 7 月南海东沙群岛海试结果对比图^[31]。(a)拖曳链;(b)传统站位观测

Fig. 3 Comparison of sea trial results in Dongsha Islands, South China Sea, July 2017^[31]. (a) A towing chain; (b) traditional station observation

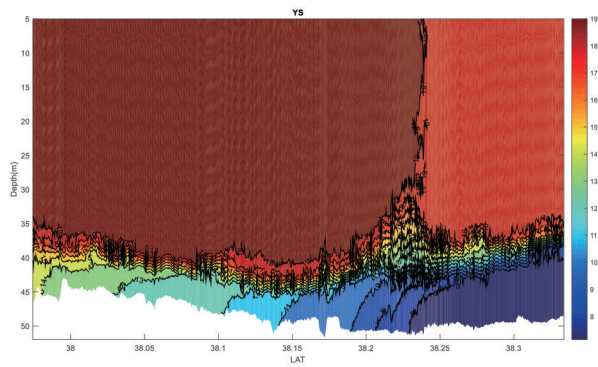


图 4 2017 年 10 月北黄海海试航行方向及冷水团全海深温度剖面^[31]

Fig. 4 The sea trial direction and the total depth temperature profile of the cold water mass in the north Yellow Sea in October 2017^[31]

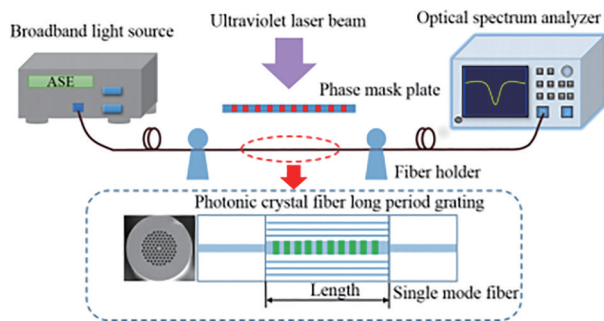


图 5 光子晶体长周期光栅测量系统示意图及其传感器结构^[32]

Fig. 5 Schematic of photonic crystal long period grating measurement system and its sensor structure^[32]

经过换算,北京信息科技大学祝连庆教授团队和印度技术学院的两种长周期方案都可以达到 GB/T 23246—2009《电导率温度深度剖面仪》技术指标的二级标准,但是该技术的实际应用还有很长一段路要走,首先要解决的就是海洋污染物或藻类的附着问题。

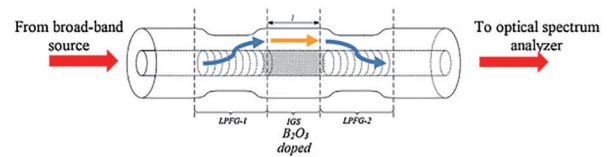


图 6 印度技术学院的传感器结构示意图^[34]

Fig. 6 Schematic of the sensor structure at the Indian Institute of Technology^[34]

2018 年,吉林大学报道了周期为几十 μm 的长周期光栅^[35],采用飞秒激光刻写的方式,研制了周期为 $40 \mu\text{m}$ 的光栅,这个周期长度介于长周期光栅和布拉格光栅之间,其光谱特性也介于两者之间。因此,这个传感器的优点是既有布拉格光栅的反射特性,又有长周期光栅的透射特性,两种类型的光栅同步工作,以消除温度、折射率的交叉敏感;但缺点是长周期光栅的线宽过大。

同年(2018 年),中科院半导体研究所李芳团队设计并制作了高分辨率长周期光纤光栅折射率传感器^[36]。使用级联长周期光纤光栅方案,结合高精度解调仪来提高测量分辨率;采用较高次包层模并腐蚀光纤包层的方案来提高长周期光纤光栅折射率灵敏度。制作的传感器灵敏度为 -344.04 nm/RIU ,分辨率达到 10^{-6} RIU 量级。此外,李芳团队^[36]还设计并制作了高灵敏度长周期光纤光栅温度传感器,其灵敏度为 $1.26 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,约为普通长周期光纤光栅的 10 倍。

2019—2020 年,重庆理工大学对涂覆石墨烯的长周期光纤光栅折射率传感器进行了研究报道^[37-38]。涂覆石墨烯的长周期光纤光栅折射率传感器(GO-LPFG)的平均折射率灵敏度较未涂覆 GO 的 LPFG 提高了 1.09 倍。随着光栅直径的减小,GO-LPFG 的平均折射率灵敏度进一步提高。当光栅直径为 $108 \mu\text{m}$ 时,在 $1.333 \sim 1.448$ 折射率内的平

均波长和耦合强度折射率灵敏度分别约为 38.99 nm/RIU 和 57.33 dB/RIU, 与未采用 GO 修饰的直径为 108 μm 的 LPFG 及直径为 125 μm 的 GO-LPFG 相比, 其平均波长和耦合强度折射率灵敏度分别提高了 1.45、2.17、3.80、3.42 倍。

独特的二维结构使 GO 具有更高的响应灵敏度和生物兼容性。GO 与羟基化光栅传感结合形成氢键, 使 GO 牢固地结合在光栅表面形成 GO-LPFG, 这将会是一种具有非常好的亲水和生物兼容性的传感器。

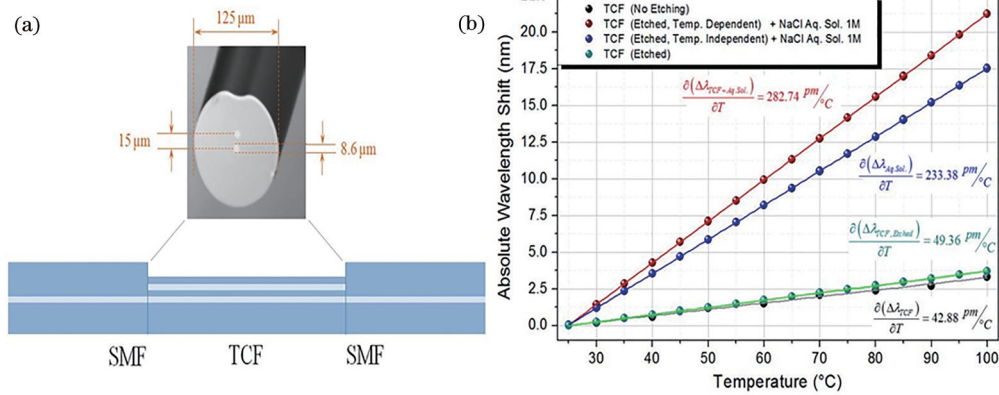


图 7 双芯光纤测量原理和数据^[39]。(a) TCF 盐度传感器原理图; (b) 盐度传感器的温度依赖性 (浓度为 1 mol/L)
 Fig. 7 Principle and data of two-core optical fiber measurement^[39]. (a) Schematic of TCF salinity sensor; (b) temperature dependence of salinity sensor (concentration is 1 mol/L)

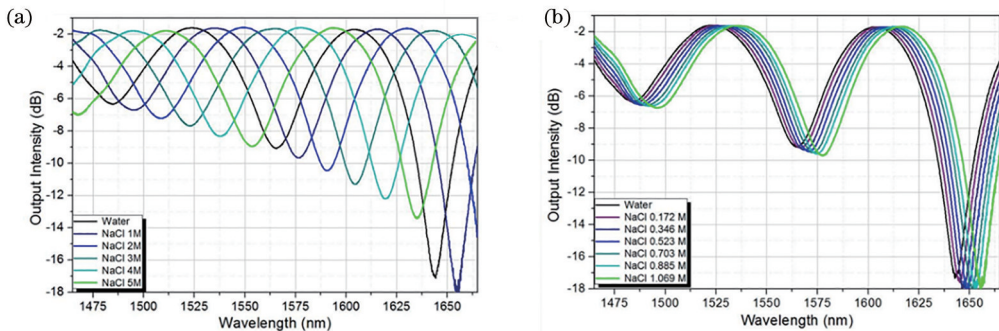


图 8 TCF 盐度传感器的光谱响应^[39]。(a) NaCl 浓度的变化范围为 0~5 mol/L; (b) NaCl 浓度的变化范围为 0~1 mol/L
 Fig. 8 Spectral response of TCF salinity sensor^[39]. (a) The NaCl concentration varies from 0 to 5 mol/L; (b) the NaCl concentration varies from 0 to 1 mol/L

综上所述, 双纤芯盐度传感器目前在实验室测量的盐度灵敏度还是比较高的, 但是不适合复用。此外, 考虑到海水里面的杂质附着问题, 这种传感器是否可以成功应用, 还有待进一步考证。

2018—2019 年燕山大学齐跃锋团队开展了基于微纳多芯光纤传感器的折射率和温度传感特性研究^[40]。该实验团队特地选取未知盐度的海水样品验

2.2 基于多芯光纤的海洋盐度传感器

2013 年, 美国佛罗里达大学的 Guzman-Sepulveda^[39] 发文介绍了一种高灵敏度的光纤盐度传感器 [图 7(a)], 可以适用于海洋测量; 其测量原理是一种基于双芯光纤 (two-core fiber, TCF) 的简单、紧凑的光纤传感器, 可以执行高灵敏度盐度测量; 盐度测量范围为 0~5 mol/L 和 0~1 mol/L, 灵敏度分别为 14.0086 nm/(mol·L⁻¹) 和 12.0484 nm/(mol·L⁻¹) (图 8)。

证了基于微纳多芯光纤折射率传感器的测量误差, 得到该拉锥长度为 16.20 mm 的传感器的折射率灵敏度为 5815.50 nm/RIU, 实际测量误差小于 0.35%; 最后理论分析了该结构的传感器可以通过引入 FBG 来解决折射率与温度的交叉敏感问题。

2.3 基于 Michelson 和 Mach-Zehnder 的海水盐度传感器

2012 年, 香港理工大学的 Liao 等^[41] 提出了一种

基于开放式微腔的光纤在线型 Michelson 干涉式传感器。该传感器利用飞秒激光技术在单模光纤末端刻制半开口凹形腔,其折射率灵敏度可达到 975 nm/RIU ,且该结构传感器可以实现单端测量。

2014年,哈尔滨工程大学的 Zhang 等^[42]提出了一种基于单模光纤的模间干涉式折射率传感器:将小段多模光纤一端与单模光纤熔接,在另一端镀金薄膜形成光纤式 Michelson 传感结构。该传感器结构简单,光波损耗小,折射率灵敏度可达到 -110.5 nm/RIU 。

2016年,山东科技大学的 Li 等^[43]提出了一种全光纤 Michelson 干涉式传感器:将一段超细芯光纤的一端与单模光纤熔接,另一端通过法拉第旋光镜使光信号反射回来。该传感器在 $1.38 \sim 1.435$ 折射率区间内的折射率灵敏度为 -48.85 nm/RIU ,且具有制作简单、稳定性高、功率损耗低的优点。

2018年,暨南大学的苏达顺等^[44]设计了一种单端反射式 Mach-Zehnder 干涉仪,将两段光纤对称地错位熔接在一段长度为几百微米的单模光纤两端,在一段光纤端面镀上金膜使传输光在端面发生反

射。由于外界环境和包层材料内传输的光波间存在光程差,因此会产生干涉现象。实验结果显示,当偏置量为 $62.5 \mu\text{m}$ 、空腔长度为 $554 \mu\text{m}$ 时,其折射率灵敏度为 -13257 nm/RIU 。该传感器能够实现超高灵敏度测量,但制作难度较大。图 9 为单端反射式光纤干涉仪的原理图。

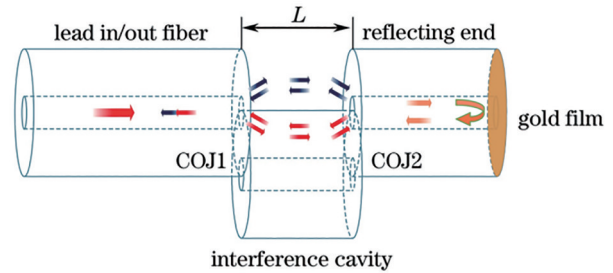


图 9 单端反射式光纤干涉仪原理图^[44]

Fig. 9 Schematic of single-ended reflective fiber interferometer^[44]

2.4 基于 F-P 腔的海水压力传感器

2001年,美国弗吉尼亚理工学院的 Wang 等^[45]采用毛细管和光纤构成 F-P 空气腔,通过毛细管侧向受压改变腔长的方法进行压力传感,最高测量压强为 41.4 MPa (图 10)。

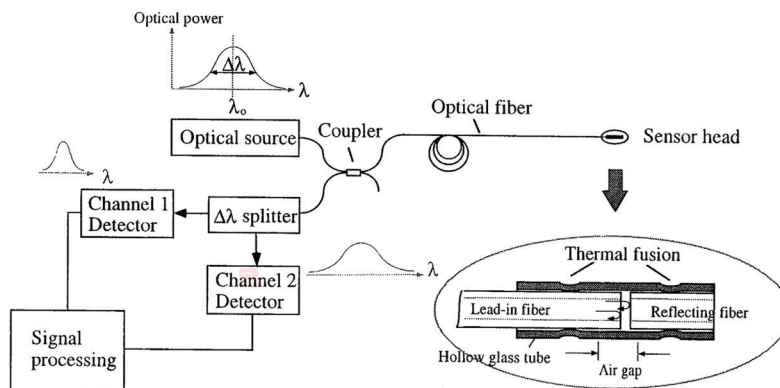


图 10 毛细管和光纤构成 F-P 空气腔的传感原理图^[45]

Fig. 10 Sensing schematic of the F-P air cavity formed by capillary and optical fiber^[45]

2011年香港理工大学的 Ma 等^[46]通过电弧熔接在光纤端面制作出可感受压力的微泡式 F-P 腔,测量压强达到 40 MPa (图 11)。

2011年,香港理工大学的 Wu 等^[47]将实芯光子晶体光纤两端与单模光纤熔接制作 F-P 腔,在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 的压强测量范围均为 $0 \sim 40 \text{ MPa}$ 。

2012年,香港理工大学的 Liu 等^[48]采用双芯光子晶体光纤(twin-core photonic crystal fiber, TC-PCF)与单模光纤熔接制作 F-P 腔,在实验室的测试条件下实现了 $0 \sim 45 \text{ MPa}$ 的压强测量(图 12 和

图 13)。这种光子晶体 F-P 腔传感器结构小巧,灵敏度高于普通 FBG 传感器。

2016年,天津大学刘铁根教授团队结合光纤机电技术和光纤 F-P 传感技术制作了膜片式光纤 F-P 压力传感器^[49]。这种传感器具有灵敏度高、一致性好的特点。

光纤 F-P 大压力传感器芯体的结构如图 14 所示。可以看到,传感器芯体主要由传感器芯片、硼硅玻璃毛细管和多模光纤构成。通过硼硅玻璃毛细管实现传感膜片的固定、支撑以及传感膜片与多

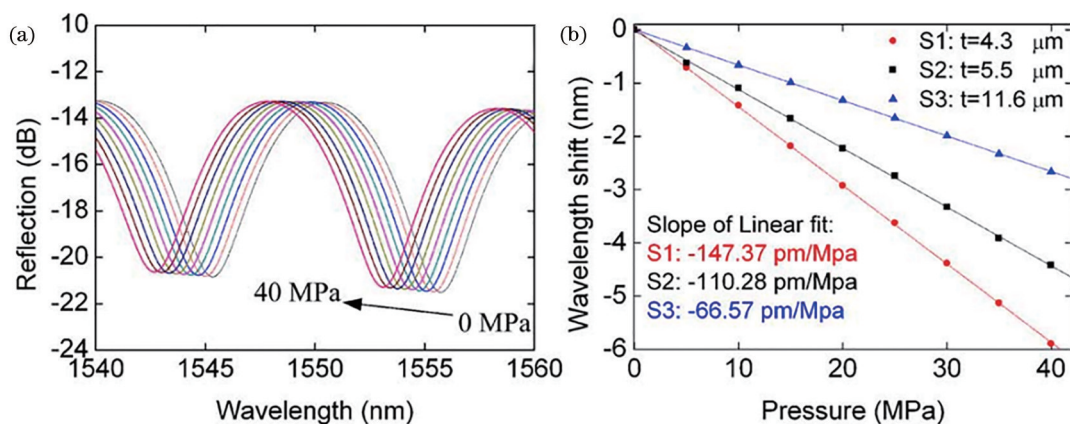


图 11 传感器响应曲线和灵敏度^[46]。(a)微腔传感器的响应;(b)不同微腔传感器的压力灵敏度

Fig. 11 Sensor response curves and sensitivity^[46]. (a) Response of microcavity sensors; (b) pressure sensitivity of different microcavity sensors

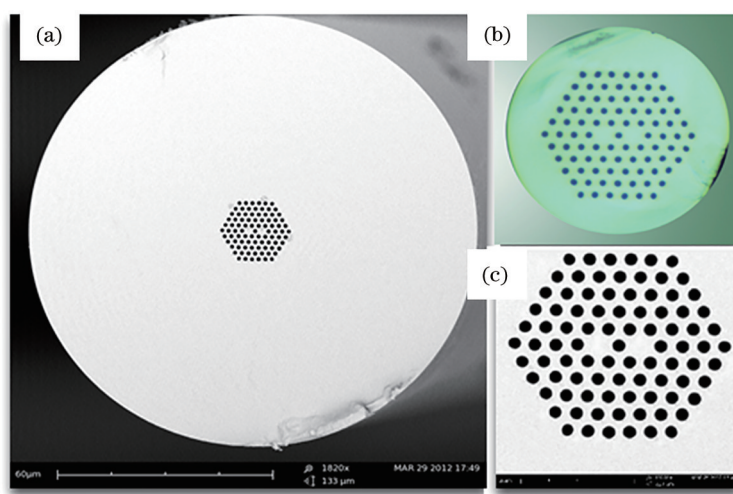


图 12 光纤断面结构^[48]。(a)光纤断面;(b)光纤横断面的局部放大图;(c) TC-PCF 的 SEM 照片孔部分

Fig. 12 Fiber cross-section structure^[48]. (a) Optical fibre cross-section; (b) local enlarged view of optical fibre cross-section; (c) SEM photo hole part of TC-PCF

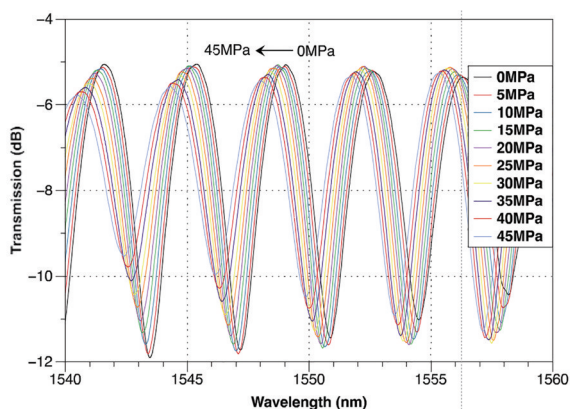


图 13 当静液压强从 0 MPa 变为 45 MPa 时,传感器的光谱发生位移^[48]

Fig. 13 The spectrum shift of the sensor with the hydrostatic pressure changes from 0 MPa to 45 MPa^[48]

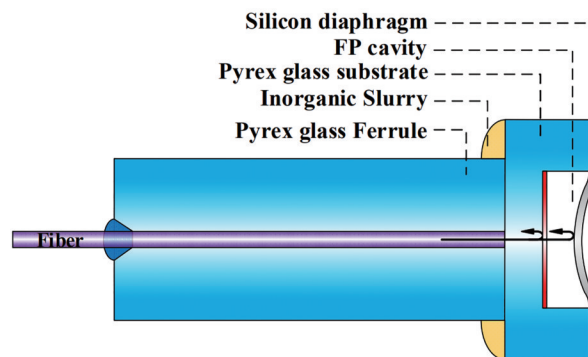


图 14 光纤 F-P 大压力传感器芯体结构图^[49]

Fig. 14 Fiber-optic Fabry-Perot high pressure sensor core structure^[49]

模光纤间的连接、准直。多模光纤作为光的传输介质,经玻璃毛细管与传感器芯片紧密贴合。通过无机焊料实现传感器芯片与玻璃毛细管间的密封连接,并通过环氧树脂结构胶将多模光纤与玻璃毛细管密封固定。传感系统工作时,光源发出的光经多模光纤垂直入射传感膜片,其中一部分光经微腔底面的反射膜反射,另一部分光经过真空 F-P 腔后由单晶硅膜片底面反射回到光纤,两束光发生低相干干涉。当外部压力发生变化时,感压膜片在压力作用下产生弯曲,改变了两束光的光程差,从而产生不同的低相干干涉条纹。通过对低相干干涉条纹的解调,可以得到对应的压力值,从而实现高精度压力传感。

这种传感器的腔长是一个非常重要的参数指标,在应用之前需要大量的老化实验,同时传感器的鲁棒性和稳定性也需要大量的实验来验证。此外,传感器的耐热性和温度重复性也需要进一步进行研究,以探索更好的温度补偿方法。

2020 年北京理工大学的刘天沐等^[50]提出了一种同时测量压力和温度的传感器。该研究团队在普通光纤和光子晶体光纤之间熔接一段空心光纤构成了干涉结构。空心光纤段构成了非本征 F-P 干涉仪,利用光子晶体光纤的微孔与外界相通。实验表明传感器能够在 28~800 °C 的温度下和 0~10 MPa 的压强下稳定工作,测量范围内温度灵敏度可达 17.4 nm/°C,压力灵敏度随温度增加而降低,在 28 °C 时可达 1460.5 nm/MPa。

2.5 基于谐振、耦合技术的新型光纤海洋温盐深传感器

2014 年,中国海洋大学的 Yang 等^[51]从理论上设计了基于微纤维结谐振器 (microfiber knot resonator, MKR) 的海水温度传感器,并进行了实验验证。如图 15 所示:随着超细纤维直径在 2.30~3.91 μm 范围内不断增大,传感灵敏度增加,这与实验获得的结果吻合;通过选择适当的参数,测得的最大灵敏度可以达到 22.81 pm/°C。

2015 年,中国海洋大学的 Wang 等^[52]提出了一种基于高双折射椭圆光纤 (high-birefringence elliptic fiber, HBEF) Sagnac 环的海水温度传感方法,其测量原理是利用温度变化与干涉峰位移之间的线性关系,如图 16 所示;传感灵敏度随 HBEF 长度 L 的增加和波长的减小而增大,其模拟光谱如图 17 所示。通过优化探测系统参数,获得的温度传

感灵敏度为 472 pm/°C,检测范围为 10~30 °C,波长为 1310 nm (通信窗口),光纤长度为 98.9 cm。

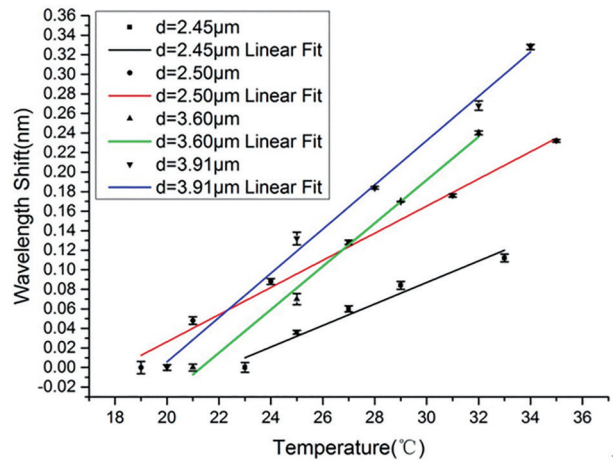


图 15 灵敏度与光纤直径关系曲线^[51]

Fig. 15 Relationship curves between sensitivity and fiber diameter^[51]

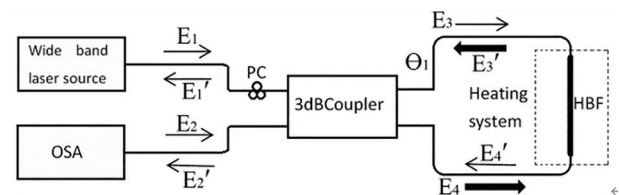


图 16 基于 Sagnac 回路的 HBEF 传感器原理图^[52]

Fig. 16 Schematic of HBEF sensor based on Sagnac loop^[52]

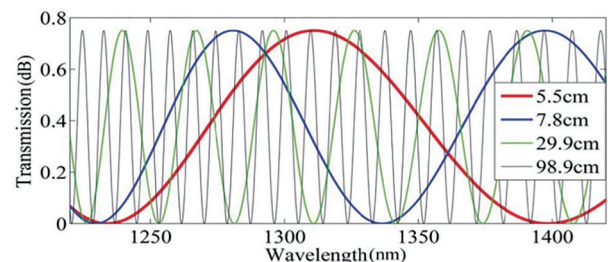


图 17 L 为 5.5 cm (红色)、7.8 cm (蓝色)、29.9 cm (绿色) 和 98.9 cm (黑色) 时的模拟光谱^[52]

Fig. 17 Simulated spectra when L is 5.5 cm (red), 7.8 cm (blue), 29.9 cm (green), and 98.9 cm (black)^[52]

2019 年,国防科学技术大学的 Yu 等^[53]研制了一种基于光纤耦合器 (optical microfiber coupler, OMC) 的全光纤海水 CTD 传感器,传感器的实验过程如图 18 所示。在改进的火焰刷法基础上,将两根传统的光纤捻成一根一根的细束,制成 OMC;通过监测感应倾角,可以实现对海水盐度、温度和深度 (压力) 的原位测量;OMC 具有水深 (压力) 传感功能,其压力灵敏度比裸光纤光栅 (0~25 MPa) 的宽压

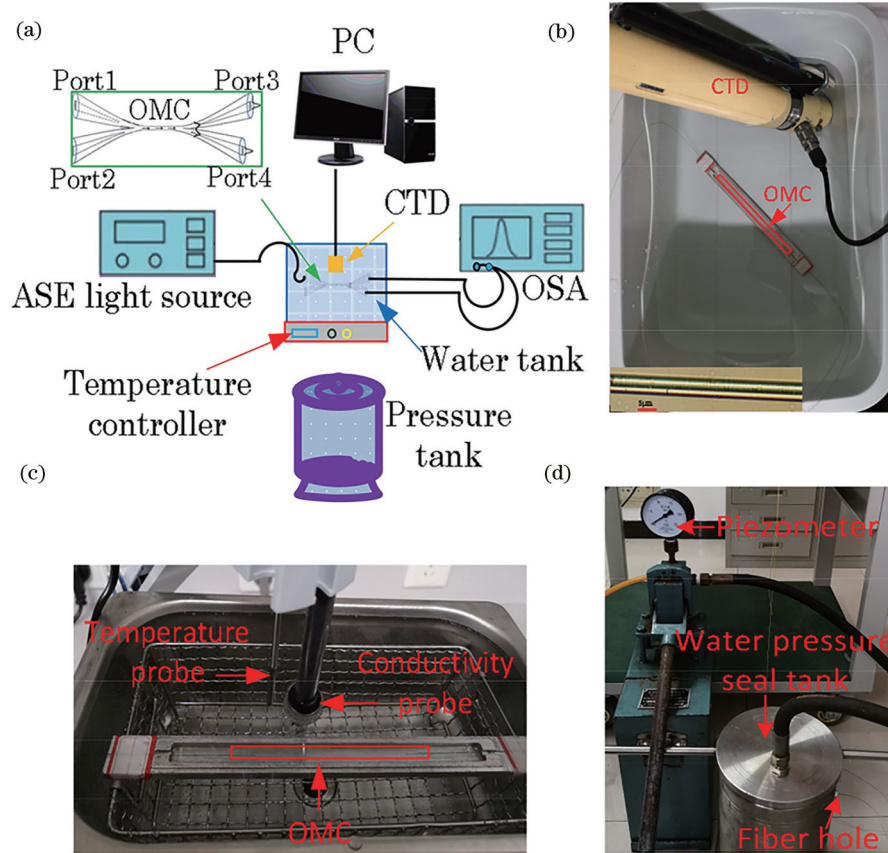


图 18 OMC 传感器实验过程^[53]。(a)测量海水盐度、温度和深度的实验装置示意图；(b)盐度测量实验装置和 OMC 样品的光学显微镜图像；(c)温度测量实验装置；(d)深度测量实验装置

Fig. 18 OMC sensor experiment process^[53]. (a) Schematic of experimental apparatus for measuring salinity, temperature, and depth of sea water; (b) optical microscope images of the experimental apparatus for salinity measurement and OMC samples; (c) experimental apparatus for temperature measurement; (d) experimental apparatus for depth measurement

力测量范围)高 50 倍;盐度、温度和深度的最高灵敏度分别为 1596 pm/‰、2326 pm/℃和 169 pm/MPa。该全光纤海水 CTD 传感器可满足海洋动态环境监测和光纤水听器水下目标探测系统的要求。

2020 年中国矿业大学的刘海等^[54]设计了一种基于表面等离子体共振 (SPR) 效应的高灵敏度温度传感器,并在光子晶体光纤 (PCF) 包层外侧填充金纳米薄膜和温敏薄膜 (PDMS),该传感器具有结构简单、工艺成熟、可逆性好等优点。随着温度的升高,PDMS 的有效折射率将降低,从而导致纤维芯模的损耗峰向短波方向移动。利用全匹配层边界条件,对 SPR-PCF 材料的损耗谱特性进行有限元分析,实现了对温度的高灵敏度、高精度、快速测量。该感应器在 22~47 °C 温度范围内的温度灵敏度可达 -8.18 nm/℃。

2020 年北方工业大学的陈强华等^[55]基于 Kretschmann 结构,建立了四层介质光纤表面等离

子体共振 (SPR) 传感器的理论模型,并给出了光纤 SPR 的传感测量公式。模拟结果表明,在折射率为 1.333~1.336 的条件下,反射波的 p、s 偏振量的相位差与折射率的变化几乎呈线性关系。他们将双频激光作为光源,设计了一种基于共光路结构的外差干涉光纤 SPR 测量系统,该系统采用相位调制的信号处理方法,提高了传感器的测量分辨率。利用外差干涉光纤 SPR 测量系统对甘油溶液进行实验校准,得到的结果与理论分析结果一致,并与其他测定方法得到的结果吻合,其折射率的相对误差小于 8.0×10^{-5} 。

2021 年安徽大学信息材料与智能感知安徽省实验室的方莎莎等^[56]基于光纤 Sagnac 干涉仪 (FSI) 与极化模数干涉仪 (PMI) 级联结构,提出了一种高灵敏光纤温度应变传感器。作为基准干涉仪,FSI 是在 Sagnac 环内引入椭圆芯保偏光纤 (ECPMF),它对温度、应变、弯曲和扭转不敏感。采用 PMI 作

为传感干涉仪,将保偏光纤的快轴、慢轴相结合,将光纤的起偏器与镀金的端面相结合,制成 45° 角的熔接体。基准干涉仪的自由波段(FSR)很容易被调整到接近敏感干涉仪的FSR,从而产生光学光标效应,提高测量灵敏度。实验结果表明:所设计的串联传感器具有 $15.56 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的温度灵敏度,以及11.12倍于单一PMI的温度和11.81倍的应变灵敏度。该传感器具有灵敏度高、制造简单、工作稳定等特点。

对于实际应用的传感器,决定其使用性能的主要是可靠性和稳定性,没有较高可靠性、稳定性的研究工作和海试验证,传感器无法真正走向实用。但国内外文献中有关这方面性能的研究鲜有报道。

在光纤温度传感器方面,科研人员多从原理方面报道了提高灵敏度的诸多方案,但对其综合性能如压力和盐度对温度的交叉敏感、响应时间、长期稳定性、耐震动冲击能力等的研究较少。在压力传感器方面,虽然国内的大量土建工程促进了商用的光纤压力传感器的发展,但其长期稳定性指标与成熟的电子学压力传感器还有一定差距,动态响应和实时温度补偿性能还有待改善。在盐度传感器方面,首先是缺乏行业认可的定标依据,面对成分复杂的海水,光学传感器所测的折射率如何与海水状态参数即盐度、温度、压力建立精确的数量关系;其次是原理性验证、单一溶质实验报道居多,真正海试的较少;最后,对于基于光学折射率的测量,几乎所有的方案都受到附着物的影响,诸如此种工程化研究几乎是空白。

海洋科学是基于海洋调查的科学,而海洋调查的根本是性能可靠的各类传感器和平台。在海洋研究走向大洋深渊的今天,海洋科学家对调查的支撑技术提出了更高的要求。将光纤传感领域新原理、新技术应用到深海大洋中,最重要的是通过大量工程化应用使实验室成果走向实用。

作为海洋科学的基础学科,物理海洋学关注的是海洋中的动量、能量与物质输运过程及其变化规律,其基本研究对象是海水的运动,即海流。而海水运动由大尺度到小尺度,最终以湍流混合的形式耗散;海洋湍流能量耗散过程成为物理海洋学的重要研究焦点^[57]。然而,对湍流问题的研究至今也没有得到完全一致的结论,湍流问题一直以来都被认为是流体力学中的难题。著名物理学家理查德·费曼将湍流称为“经典物理学中最后的未解难题”,人

们经过一百多年的不懈研究,才逐渐认识到湍流是一种三维空间不规则的非定常运动,属于时空随机过程^[58]。

3 光纤流速类传感器的研究进展

近几年关于海流尤其是湍流的文章多次发表在*Nature*、*Science*及其子刊上。2017年,英国国家海洋中心的Garabato等^[59]在*Nature*上发表文章称湍流混合的快速耗散使得融水最终沉淀到深处;Garabato等使用一个理想的海洋环流模型来证明这种机制与南极冰架的加速融化有关;并建议将这种产生深度融水的机制——南极融化的动态稳健特征纳入气候尺度模型,其研究区域如图19所示。

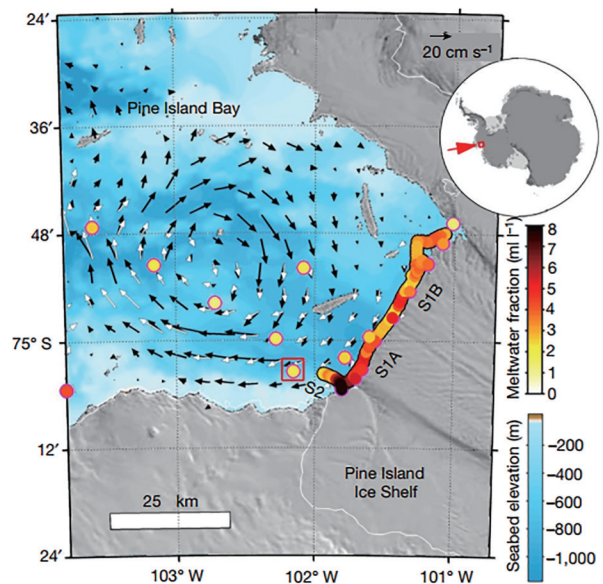


图 19 研究区域^[59]

Fig. 19 Research area^[59]

2018年,德国莱布尼兹淡水生态研究所的Bergkvist等^[60]在*Nature Communications*上发文,表示他们使用二次离子质谱结合稳定同位素示踪剂,在低营养浓度的静止条件和湍流剪切下,测量了两种形成链的硅藻(骨架藻和角毛藻)的细胞特异性碳、硝酸盐和铵同化,并将数据与传质理论预测的数据进行比较。这个实验证明了:与静止条件相比,湍流剪切显著增加了细胞特异性同化,细胞/链也会形成快速下沉、富含碳和铵的聚集体;湍流同时激发了海洋中小规模的生物 CO_2 同化和大规模的生物地球化学碳氮循环。

2019年,东京海洋科技大学的Takeuchi等^[61]在*Scientific Reports*上发文称:实验室和原位研究表

明,底栖边界层中的湍流对于海洋聚集体的形成和破坏很重要,其上层海洋聚集和解离速率的湍流中介作用关系如图 20 所示,但是少量的实地观察限制了我们对湍流在海洋表面聚集过程中所发挥作用的理解;而通过大颗粒($>0.05\text{ cm}$)的凝结形成的海洋聚集体(也称为“海洋积雪”)通过从富营养区下沉对全球碳通量作出了重大贡献,也影响了地球的气候。

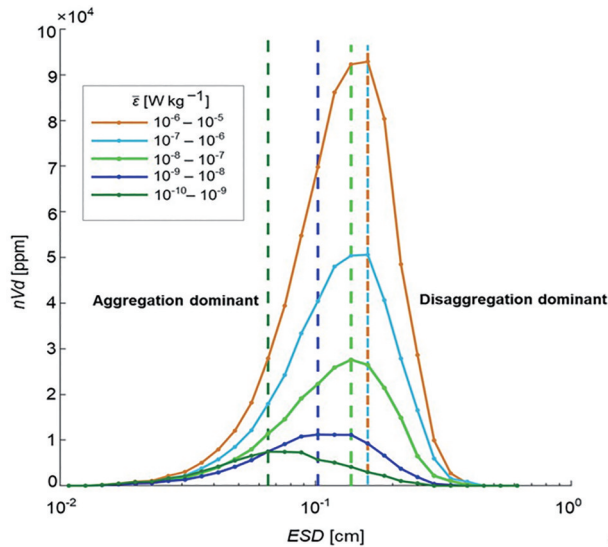


图 20 上层海洋聚集和解离速率的湍流中介作用^[61]
Fig. 20 Turbulence mediating effects of aggregation and dissociation rates in the upper ocean^[61]

2020年,中国科学院海洋研究所通过观测和数值模拟,研究了南海北部内潮的相干和非相干特征;通过 11 个月的系泊流观测,证明了湍流参数化模型与潮汐、内潮有关^[62]。

此外,从任何一个物理海洋学的实质性突破上都不难发现观测手段和探测技术的革新^[57],由于物理海洋学发展的基石其实是监测手段的革新,因此为了使海洋科学家们对海洋混合的发生过程和机制、海洋模式演变以及海洋的气候模型有更深入的认识和了解,开展海洋流速、湍流观测的研究极有必要。

3.1 基于多芯光纤的流速传感器

2008年,哈尔滨工程大学提出了一种基于双芯光纤 Michelson 干涉仪的新型光纤流速传感器^[63]。该传感器仅以一段双芯光纤为圆柱形悬臂梁,流体以未知的速度流动时所施加的力使光纤弯曲,这与双芯光纤内集成 Michelson 干涉仪的相位移动相对应。这种双芯光纤传感技术可以自动补偿由于干涉仪两臂受环境温度和压力的影响而产生的环境温度变化和压力变化。这种基于双芯光纤的流速传感

器的优点是:1)结构简单紧凑;2)不受环境温度、压力变化的影响;3)灵敏度与双芯光纤悬臂梁长度无关;4)灵敏度可以通过转动双芯光纤的方向进行调节。这种传感器也可以应用于海水流速的测量。

2019年,燕山大学的白景华^[64]报道了关于多芯光纤流速/流向测量技术的研究工作。其原理是在多芯光纤上刻写不同波长的布拉格光栅,这种传感器的优点是可以同时测量曲率和受力方向,应用到海洋环境中,可实现流速和流向的同时测量,很好地消除环境温度对实验测量的影响。目前该传感器还处于实验室研究阶段,缺乏在真实水文环境下的应用测试。如果该实验的解调仪和控制平台精度能够进一步提高,预计传感器可以具备更好的性能。

3.2 基于光纤传感的两种海洋湍流传感器

湍流的耗散形式有两种,一种是湍动能耗散,另一种是热耗散。关于湍动能耗散率的测量目前国际上都是基于压电陶瓷的方法。热耗散方面主要有关于快速变温传感器 FP07 的报道,其对温度的响应时间为 7 ms。如何让光纤传感器具有响应快且灵敏度高的特性,这是一个难点问题。

2015年,Liu等^[65]利用基于 F-P 腔干涉的方法测量海水温度的变化,并与 FP07 所测得的信号进行对比。传感器头的结构如图 21 所示。将圆柱体硅安装在单模光纤的端面上,硅柱体作为 F-P 腔干涉仪的重要组成部分,在纤维硅和硅周围的界面上两个反射结合并发回干涉光谱,其特征是具有一系列的倾斜波长和峰值波长。

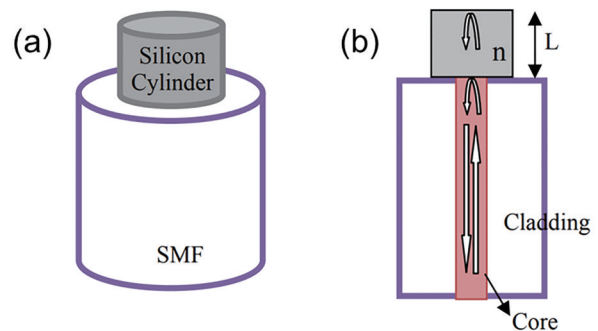


图 21 传感器头的结构^[65]。(a)传感器探头结构示意图;
(b)工作原理说明

Fig. 21 Structure of sensor head^[65]. (a) Schematic of sensor probe structure; (b) description of working principle

之后通过向一桶冷水中倒入一些热水来产生湍流。将光纤传感器与商用快速响应热敏电阻 (FP07) 进行比较,FP07 既可作为参考,也可作为

校准。两个传感器被部署在彼此的附近。两种传感器的实验结果对比如图 22 所示。显然, 光纤传感器不仅很好地跟踪了 FP07 热敏电阻, 还跟踪了更多的快速温度变化细节。这些有用的温度剖面

将为水下湍流对海洋成像影响的分析提供有力的工具; 这个实验结果展现了光纤传感在快速变温测量领域应用的可能性, 也为海洋学应用提供了参考。

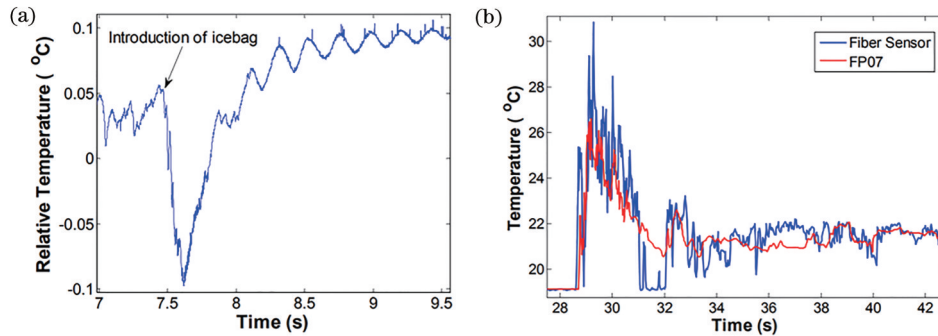


图 22 快速变温湍流热耗散传感器实验数据^[65]。(a) 将一个冰袋放在水面上; (b) 将一些热水倒入一桶冷水中, 检测水的湍流, 并将商用高速热敏电阻 FP07 的响应作为校准和参考

Fig. 22 Experimental data of a fast-changing temperature turbulent heat dissipation sensor^[65]. (a) Place an ice pack on the surface of the water; (b) measure turbulence by pouring some hot water into a bucket of cold water, and the response of a commercial high speed thermistor FP07 is provided for calibration and reference

2020 年, 中国科学院半导体研究所李芳团队采用短周期布拉格光纤光栅作为传感元件(传感器的封装结构如图 23 所示)^[66], 基于相位产生载波 (phase generated carrier, PGC) 的解调技术采用与电学类传感器类似的翼型探针和等强度钛合金悬臂梁等技术在实验室完成了传感器探头和解调仪原理样机的搭建。该套系统可以测量海洋湍流引起的切向速度变化率。解调系统分辨率达到

$0.001 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 传感器的灵敏度达到 $4.37 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2/\text{kg}$ (这个灵敏度实测结果与 PNS01 相近), 在空气中的固有频率为 595 Hz, 与理论值相近。它在水中的共振频率 (534 Hz) 超过了海洋湍流的最高频率 (200 Hz), 且两种传感器的实验室标定信号相关度达到了 0.91607 (图 24)。这种传感器的应用有望于填补海洋地边界层附近湍流测量数据的空白。

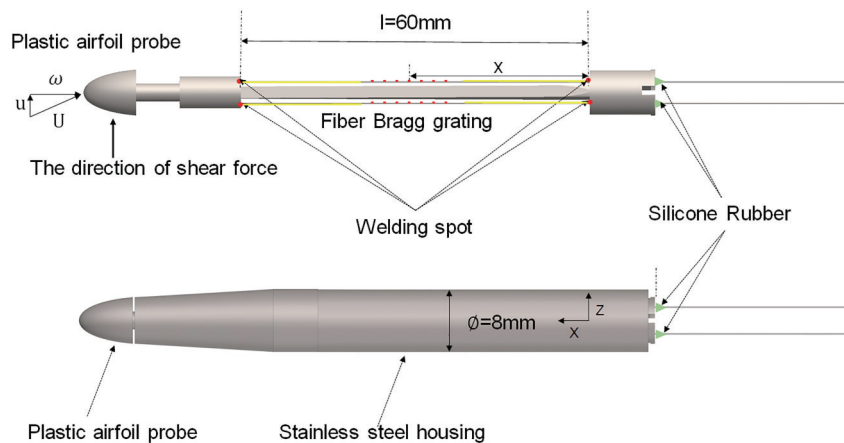


图 23 传感器封装结构^[66]

Fig. 23 Sensor package structure^[66]

目前, 有关光纤传感在海洋湍流测量领域的应用研究方面的报道还很少。目前国际上的大形势是转向传感器的载体研究, 如开发更稳定的湍流剖面

仪平台, 或搭载水下滑翔机等。由于国内还没有比较成熟的湍流传感器产品化应用的实例, 因此对湍流传感器的研究依然需要科研工作者的不懈努力。

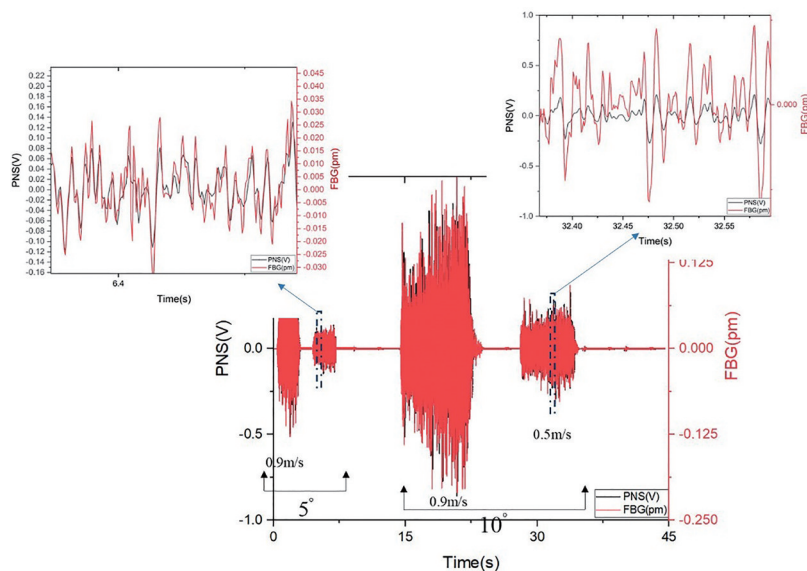


图 24 PNS 信号与 FBG 信号相关性对比图^[66]

Fig. 24 Comparison diagram of correlation between PNS signal and FBG signal^[66]

4 结论与展望

目前,我国在传统的电子类温盐深流传感器制造领域与国际的先进产品还有一定差距,但本文认为在“传统车道内”很难形成“弯道超车”的局面。在光纤

传感这个新兴的领域,在各个原理的把握上国内学者都有积极的创新意识,并获得了很好的实验现象,处于国际第一梯队的水平。不过在海洋温盐深流方面的光纤传感器依然有许多不足之处。本文将光纤传感在温盐深流方面的优缺点总结如表 1 所示。

表 1 光纤温盐深流传感器优缺点总结

Table 1 Summary of advantages and disadvantages of fiber optic temperature, salinity, depth, and flow sensor

Parameter	Advantage	Disadvantage
Temperature	<ul style="list-style-type: none"> ① The sensors are intrinsically insulated and resistant to electromagnetic interference. ② Low cost and easy reuse of sensing probes. ③ Suitable for long time, real time, fast, <i>in-situ</i> measurements. ④ Networked measurements for different scales of the ocean 	<ul style="list-style-type: none"> ① Complex principles of demodulation equipment in general. ② High precision demodulators are expensive. ③ Lack of accuracy of mature products (less than 0.001 °C)
Salinity	<ul style="list-style-type: none"> ① The FBG temperature sensor and the F-P refractive index sensor can be used to solve the salinity spike problem by using the co-axial integration of capillary quartz tube nested inside and outside to achieve a true co-point measurement. ② High sensitivity salinity sensors can be made based on different principles 	<ul style="list-style-type: none"> ① Long response time, generally higher than 50 ms (compare with the CTD instrument from Sea Bird, USA). ② The calibration process requires complete replacement of the liquid, which is a complex process, and the accuracy can generally only reach the secondary standard. ③ Immature calibration protocols and lack of unified measurement standards
Depth	<ul style="list-style-type: none"> ① High sensitivity. ② Fast response time 	<ul style="list-style-type: none"> ① Creep problem has not been solved. ② Accuracy is generally slightly lower than that of electronic sensors
Flow rate of turbulence	<ul style="list-style-type: none"> ① The low cost of the sensing probe can be made expendable for use to fill the gap in the bottom boundary layer turbulent kinetic energy dissipation rate measurement data. ② Good long-term stability of the sensor 	<ul style="list-style-type: none"> ① The calibration process is complicated. ② Interferometer is sensitive to noise, and it will be challenging to improve the signal-to-noise ratio for sea trial data

在解调方面还存在多种限制因素,如反射式匹配光纤光栅滤波法存在系统信噪比低的问题,透射式光纤光栅滤波法存在非线性误差较大的问题,而边缘滤波法的器件对温度过于敏感而引起的温度补偿误差问题,高精度的可调谐 F-P 滤波解调系统造价高昂且滤波损耗较大。科研工作者如果把握机会,攻克上述技术上的难点,很有可能使光纤传感器在物理海洋观测领域上实现质的突破,进一步解决国内海洋观测类传感器依赖进口的“卡脖子”问题。目前大多数研究所和大学的研究都止步于实验室,缺少工程化应用的研究。科研人员设计的传感器应该走出实验室,只有在工程化和市场化的应用过程中得到足够多的用户反馈,才能促使我们的传感器各方面的性能走向成熟。

参 考 文 献

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis[R]. Geneva: IPCC, 2007: 1535.
- [2] Winton M, Griffies S M, Samuels B L, et al. Connecting changing ocean circulation with changing climate[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(7): 2268-2278.
- [3] Hock R, Rasul G, Adler C. High mountain areas: in IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. Geneva: IPCC, 2019.
- [4] OOI. Deep ocean observing workshop: in deep ocean observing workshop 2018[R]. Seattle: Ocean Observatories Initiative, 2018.
- [5] MBARI-Monterey Bay Aquarium Research Institute [EB/OL]. [2021-03-25]. <https://www.mbari.org/technology/>.
- [6] Doos. A global network of deep ocean observing[R]. Geneva: Deep Ocean Observing Strategy, 2020.
- [7] Deep Ocean Observing Strategy (DOOS) [EB/OL]. [2021-03-25]. <https://deepoceanobserving.org/>.
- [8] Ocean networks Canada. Watch and read: know the ocean with ocean networks Canada [EB/OL]. [2021-03-25]. <https://www.oceannetworks.ca/about-us>.
- [9] Neptune. Tsunami studies [EB/OL]. [2021-03-25]. <https://www.oceannetworks.ca/science/active-research/tsunami-studies>.
- [10] Venus. Discover the ocean, understand the planet [EB/OL]. [2021-03-25]. <https://www.oceannetworks.ca/>.
- [11] ESONET, Network of Excellence. Presentation [EB/OL]. [2021-03-25]. <http://www.esonet-noe.org/About-ESONET>.
- [12] ESONET, Network of Excellence. Observatories [EB/OL]. [2021-03-25]. <http://www.esonet-noe.org/About-ESONET/Organization/Observatories>.
- [13] EMSO. What is EMSO [EB/OL]. [2021-03-25]. <http://emso.eu/what-is-emso/>.
- [14] Kasahara J, Shirasaki Y, Asakawa K, et al. Scientific application of ARENA networks[C]//2003 International Conference Physics and Control, June 25-27, 2003, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2003: 272-275.
- [15] Kawaguchi K M H I R. Scientific submarine cable systems in JAMSTEC [J]. *Proceedings of SubOptic*, 2001: 184-187.
- [16] JAMSTEC. About JAMSTEC [EB/OL]. [2021-03-25]. <http://www.jamstec.go.jp/e/about/>.
- [17] Gonnella G, Böhnke S, Indenbirken D, et al. Endemic hydrothermal vent species identified in the open ocean seed bank [J]. *Nature Microbiology*, 2016, 1: 16086.
- [18] de Boer A M, Sigman D M, Toggweiler J R, et al. Effect of global ocean temperature change on deep ocean ventilation [J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(2): A2210.
- [19] Archer D, Martin P, Buffett B, et al. The importance of ocean temperature to global biogeochemistry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(2): 333-348.
- [20] Wilson W D. Equation for the speed of sound in sea water [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1960, 10(32): 1357.
- [21] Dushaw B D, Worcester P F, Cornuelle B D, et al. On equations for the speed of sound in seawater [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 93(1): 255-275.
- [22] Wilson W D. Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure, and salinity [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1960, 32(6): 641-644.
- [23] Wang X, Wang J, Wang S S, et al. Fiber-optic salinity sensing with a panda-microfiber-based multimode interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(23): 5086-5091.
- [24] Chen S N. Implementation of the 1978 practical salt standard [J]. *Ocean Technology*, 1982, 1(3): 4-13. 陈舜年. 贯彻 1978 实用盐标 [J]. *海洋技术*, 1982, 1(3): 4-13.

- [25] Rusby J S M. Measurements of the refractive index of sea water relative to Copenhagen standard sea water[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1967, 14(4): 427-439, IN13-IN14.
- [26] McNeil G T. Metrical fundamentals of underwater lens system[J]. Optical Engineering, 1977, 16(2): 162128.
- [27] Quan X, Fry E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. Applied Optics, 1995, 34(18): 3477-3480.
- [28] Marrec L, Bourgerette T, Datin E, et al. *In-situ* optical fibre sensors for temperature and salinity monitoring[C]//Europe Oceans 2005, June 20-23, 2005, Brest, France. New York: IEEE Press, 2005: 1276-1278.
- [29] Li X R, Li Y Q, Wen Z Y. 300 m optic fiber Bragg grating temperature sensing system for seawater measurement[J]. Journal of Physics, 2011, 276: 012130.
- [30] Pachava V R, Kamineni S, Madhuvarasu S S, et al. A high sensitive FBG pressure sensor using thin metal diaphragm[J]. Journal of Optics, 2014, 43(2): 117-121.
- [31] Wang L, Wang Y, Wang J, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth[J]. Photonic Sensors, 2020, 10(1): 57-66.
- [32] Hu H F, Du C, Wang Q, et al. High sensitivity internal refractive index sensor based on a photonic crystal fiber long period grating[J]. Instrumentation Science & Technology, 2017, 45(2): 181-189.
- [33] Li D, He W, Yan G, et al. LPPG fabricated by femtosecond laser and its characteristics of refractive index of liquid[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(3): 325-329.
李达, 何巍, 闫光, 等. 飞秒直写长周期光纤光栅及其液体折射率特性研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 325-329.
- [34] Tripathi S M, Bock W J, Mikulic P. A wide-range temperature immune refractive-index sensor using concatenated long-period-fiber-gratings[J]. Sensors and Actuators B, 2017, 243: 1109-1114.
- [35] Zheng Z M, Yu Y S, Zhang X Y, et al. Femtosecond laser inscribed small-period long-period fiber gratings with dual-parameter sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1100-1103.
- [36] An J, Wang Y J, Li F, et al. High sensitivity long period fiber Bragg grating temperature sensor using polyamide acid layer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 336-342.
安佳, 王永杰, 李芳, 等. 采用聚酰胺酸层的高灵敏度长周期光纤光栅温度传感器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 336-342.
- [37] Shi S H, Wang X, Zhao M F, et al. Sensing characteristics of long period fiber grating functionalized with graphite oxide[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(11): 2305-2314.
石胜辉, 王鑫, 赵明富, 等. 基于氧化石墨修饰长周期光纤光栅的传感特性[J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2305-2314.
- [38] Zhao M F, Wang X, Luo B B, et al. Refractive index sensing characteristics of dispersion-turning-point long period fiber grating functionalized with graphite oxide[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 632-637.
赵明富, 王鑫, 罗彬彬, 等. 氧化石墨烯修饰的色散拐点长周期光纤光栅的折射率传感特性[J]. 半导体光电, 2020, 41(5): 632-637.
- [39] 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.
- [40] Qi Y F, Zhang J, Wang Y T, et al. Research on refractive index sensor based on multi-core micro-nano fiber[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [41] Liao C R, Wang D N, Wang M, et al. Fiber in-line Michelson interferometer tip sensor fabricated by femtosecond laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(22): 2060-2063.
- [42] Zhang Y X, Zhou A, Qin B Y, et al. Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(9): 1734-1740.
- [43] Li L J, Ma Q, Cao M Y, et al. High stability Michelson refractometer based on an in-fiber interferometer followed with a Faraday rotator mirror [J]. Sensors and Actuators B, 2016, 234: 674-679.
- [44] Su D S, Ma K M, Sun L P, et al. Refractive index sensing characteristics of reflective fiber interferometer based on large offset splicing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080603.
苏达顺, 马宽明, 孙立朋, 等. 基于大偏置量熔接的反射式光纤型干涉仪的折射率传感特性[J]. 激光与

- 光电子学进展, 2018, 55(8): 080603.
- [45] Wang A, Xiao H, Wang J, et al. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1495-1501.
- [46] Ma J, Ju J, Jin L, et al. A compact fiber-tip micro-cavity sensor for high-pressure measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1561-1563.
- [47] Wu C, Fu H Y, Qureshi K K, et al. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 412-414.
- [48] Liu Z Y, Tse M L V, Wu C, et al. Intermodal coupling of supermodes in a twin-core photonic crystal fiber and its application as a pressure sensor [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21749-21757.
- [49] Zhang W H. Research on fiber-optic Fabry-Perot high pressure sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
张伟航. 光纤法珀大压力传感器研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [50] Liu T M, Jiang Y, Cui Y. Photonic crystal fiber temperature and pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 0406001.
刘天沐, 江毅, 崔洋. 光子晶体光纤温度压力传感器 [J]. *光子学报*, 2020, 49(4): 0406001.
- [51] 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.
- [52] Wang X, Yang H J, Wang S S, et al. Seawater temperature measurement based on a high-birefringence elliptic fiber Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1772-1775.
- [53] 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.
- [54] Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0404003.
刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0404003.
- [55] Chen Q H, Han W Y, Kong X Y, et al. Detection of solution refractive index variation based on optical fiber surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0804003.
陈强华, 韩文远, 孔祥悦, 等. 基于光纤表面等离子体共振检测溶液折射率变化[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0804003.
- [56] Fang S S, Wu X Q, Zhang G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106004.
方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106004.
- [57] Wu L X, Chen Z H. Progresses and challenges in observational studies of physical oceanography[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(5): 542-551.
吴立新, 陈朝晖. 物理海洋观测研究的进展与挑战 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(5): 542-551.
- [58] Benzi R, Biferale L, Toschi F. Intermittency in turbulence: multiplicative random process in space and time[J]. *Journal of Statistical Physics*, 2003, 113(5/6): 783-798.
- [59] Garabato A C, Forryan A, Dutrieux P, et al. Vigorous lateral export of the meltwater outflow from beneath an Antarctic ice shelf[J]. *Nature*, 2017, 542(7640): 219-222.
- [60] Bergkvist J, Klawonn I, Whitehouse M J, et al. Turbulence simultaneously stimulates small- and large-scale CO₂ sequestration by chain-forming diatoms in the sea[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3046.
- [61] Takeuchi M, Doubell M J, Jackson G A, et al. Turbulence mediates marine aggregate formation and destruction in the upper ocean[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16280-16288.
- [62] Li B T, Wei Z X, Wang X Y, et al. Variability of coherent and incoherent features of internal tides in the north South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 12904.
- [63] Wang X. Fabrication method and characteristics of dual-core long-period fiber grating [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
王雪. 双芯长周期光纤光栅制备方法 & 特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [64] Bai J H. Research on multi-core fiber flow velocity and flow direction measurement technology[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
白景华. 多芯光纤流速/流向测量技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

- [65] Liu G G, Han M, Hou W L, et al. A miniature fiber-optic sensor for high-resolution and high-speed temperature sensing in ocean environment[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9459: 94590I.
- [66] Wang L, Wang Y J, Wang J F, et al. Fiber Bragg grating sensor for measuring rate of dissipation of turbulent kinetic energy of ocean[J]. Optical Engineering, 2020, 59(8): 087105.