

激光与光电子学进展

基于干涉型微光纤器件的海水温盐压传感方法研究进展

王姗姗¹, 肖羽萱¹, 王晶^{1*}, 廖毅鹏^{2,3}, 张君诚^{1**}

¹中国海洋大学信息科学与工程学院光学光电子实验室, 山东 青岛 266100;

²东莞理工学院电子工程与智能化学学院, 广东 东莞 523808;

³西安交通大学物理学院, 陕西 西安 710049

摘要 微光纤是直径在微米量级的一种新型光纤,近年来得到了人们的广泛关注。首先,介绍了微光纤的传感原理、导波特性及传播常数的计算方法,并总结了可以估算干涉型微光纤传感器灵敏度的通用表达式。然后,介绍了微光纤的常用制备方法以及典型干涉型微光纤传感器件,如微光纤环形谐振腔、微光纤方向耦合器、微光纤同轴马赫-曾德尔干涉仪(MZI)在海水温盐压传感探测中的应用,并重点介绍了微光纤同轴MZI的封装方法、环境适应性和响应时间。最后,对目前研究中存在的问题及未来发展趋势进行了总结及展望。

关键词 光纤光学; 传感器; 光纤传感器; 微光纤; 海水温盐压传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306015

Development of Seawater Temperature, Salinity and Pressure Sensing Based on Interferometric Microfiber Device

Wang Shanshan¹, Xiao Yuxuan¹, Wang Jing^{1*}, Liao Yipeng^{2,3}, Zhang Juncheng^{1**}

¹*Optics and Optoelectronics Laboratory, School of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;*

²*School of Electrical Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China;*

³*School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China*

Abstract Microfiber is a kind of novel fiber with diameter in the micrometer level, which aroused people's widespread attention in recent years. In this paper, first, sensing principle, guiding properties, and the calculation method of propagation constant of the microfiber are introduced, and the general expression used for estimating the sensitivity of interferometric microfiber sensor is summarized. Then, the common preparation methods of microfiber and typical interferometric microfiber sensors used in temperature, salinity and pressure sensing are introduced, such as microfiber ring resonator, microfiber directional coupler and microfiber coaxial Mach-Zehnder interferometer (MZI). Secondly, it focuses on the packaging method, environmental adaptability and response time of the microfiber coaxial MZI. Finally, the existing problems and the trend of future development of these sensors is summarized and prospected.

Key words fiber optics; sensors; fiber optics sensors; microfiber; temperature, salinity and pressure sensing of seawater

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 130.6010

收稿日期: 2020-12-25; 修回日期: 2021-01-11; 录用日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61871353, 11774189)

通信作者: *wjing@ouc.edu.cn; **zhangjuncheng@ouc.edu.cn

1 引言

温度、盐度是海水最基本的物理参数,海水温度、盐度随深度(一般由压强反演得到)的变化被称为海水的温盐深剖面,海水温度、盐度随压强变化的数据可以为海洋科学研究人员提供基本的数据资料,对于海洋经济开发、军事力量建设、海洋环境保护等领域也具有广泛的应用价值^[1-3]。不同的应用需求催生了不同类型海水温盐深数据测量方法,这些方法从测量原理上可分为电学和光学方法两种。其中,电学方法中最常用的设备为温盐深仪(CTD)^[4],即用温度、盐度、压强三个电学传感器分别实现海水的温盐压传感。相比电学方法,光学方法目前尚未成为海洋调查的主流技术,但光纤传感方法具有成本低、体积小、质量轻、抗电磁干扰能力强、可多参量传感等优点,近年来已逐渐成为海洋调查技术的研究热点。光纤传感单元不涉及内置测量电路和电池,一方面可以降低制造成本,另一方面也避免了电学传感器漏电的风险^[5]。

近年来,人们已经在实验室内演示了多种基于光纤的温盐压传感器,并将其初步应用于不同的传感领域。如在温度传感方面,Huang等^[6]提出了一种基于高锗掺杂少模光纤的温度传感器,其灵敏度优于 $97 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;Ma等^[7]提出了一种基于细无芯光纤的多模干涉温度传感器,其灵敏度约为 $38.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;Li等^[8]将基于紫外胶填充的硅胶毛细管和标准单模光纤(SMF)拼接在一起,构成了一种新型温度传感器,该传感器的灵敏度为 $0.963 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;Liu等^[9]提出了一种基于环形布局光子晶体光纤的Sagnac干涉仪温度传感器,其灵敏度可达 $18.27 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;Zhu等^[10]提出了一种基于细芯光纤的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)温度传感器,最高可测量 850°C 的温度,灵敏度为 $18.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;谭展等^[11]将空芯光纤和光纤布拉格光栅(FBG)级联制备了一种光纤传感器,在 1550 nm 波长附近空芯光纤和FBG对应的温度灵敏度分别为 $24.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $12.76 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;董航宇等^[12]将多模光纤两端与SMF拼接,并利用光纤微孔及不同芯径光纤拼接构成了一种复杂的MZI,其在高温下的灵敏度可达 $18.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;宗书尧等^[13]提出了一种基于纤芯失配与错位熔接的MZI,其温度灵敏度为 $0.073 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;Zhou等^[14]将多模光纤和利用酒精填充的空芯光纤熔接在一起,构成了

一种表面等离子共振温度传感器,在 $35.5\sim 70.1^\circ\text{C}$ 范围内的灵敏度可达 $1.16 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。在盐度传感方面,Wu等^[15]将基于聚酰亚胺涂覆的光子晶体光纤和裸FBG串联,构成了一种盐度传感器,其灵敏度为 $12.68 \text{ pm}/\text{‰}$;Guzman-Supulveda等^[16]提出了一种基于细芯光纤的盐度传感器,在不同盐度范围内的灵敏度均高于 $0.2 \text{ nm}/\text{‰}$;Meng等^[17]提出了一种基于无芯光纤的盐度传感器,在 $38.4\text{‰}\sim 216.2\text{‰}$ 盐度范围内的灵敏度为 $1.94 \text{ pm}/\text{‰}$ 。在压强传感方面,Zhang等^[18]提出了一种基于超薄FBG的压强传感器,其灵敏度为 $7 \text{ nm}/\text{MPa}$;Song等^[19]将碳纤维缠绕在圆柱形壳体上,制备了一种基于FBG的压强传感器,测量范围可达 8 MPa ,灵敏度为 $0.452 \text{ nm}/\text{MPa}$;Hou等^[20]提出了一种基于空芯光子晶体光纤的压强传感器,其灵敏度可达 $18.15 \mu\text{m}/\text{kPa}$;Tang等^[21]提出了一种基于侧开通道空芯光子晶体光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI)压强传感器,气体压力灵敏度可达 $4.24 \text{ nm}/\text{MPa}$;Zhang等^[22]提出了一种基于聚氯乙烯端面涂覆的FPI传感器,在 1565 nm 波长处的灵敏度约为 $65.5 \text{ nm}/\text{MPa}$ 。在双参数测量方面,Lin等^[23]将超结构FBG封装在一个被聚合物充满一半的圆柱体中,制备了一种温压传感器,其温度灵敏度和压强灵敏度分别为 $0.023 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $45 \text{ nm}/\text{MPa}$;Bai等^[24]提出了一种基于空气腔的FPI温压传感器,其温度灵敏度和压强灵敏度分别为 $6.95 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.15 \text{ nm}/\text{Pa}$;Dong等^[25]提出了一种基于石墨烯薄膜涂覆和FBG的温压传感器,其温度灵敏度和压强灵敏度分别为 $306.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $501.4 \text{ nm}/\text{kPa}$;Zhang等^[26]提出了一种双腔FPI温压传感器,其温度灵敏度和压强灵敏度分别为 $29.63 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $1465.8 \text{ nm}/\text{MPa}$ 。

上述方法虽然可以分别实现温度、盐度、压强的单参数/双参数传感,但要将这些传感器用于海水这一特殊环境中,还需进行有针对性的设计。如在测量海水温度方面,Wang等^[27-28]分别提出了基于高双折射光纤Sagnac干涉仪的单点海水温度传感器和连续两点海水温度传感器,其灵敏度分别为 $-472 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $-245 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;Liu等^[29]提出了一种基于细芯光纤MZI的连续两点海水温度测量传感器,其灵敏度可达 $80.91 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。在测量海水盐度方面,Yang等^[30]提出了一种基于长周期FBG的海水盐度传感器,其灵敏度为 $125.5 \text{ pm}/\text{‰}$;Mollah等^[31]提出了一种基于光子晶体光纤Sagnac干涉仪的海

水盐度传感器,其灵敏度为 $0.75 \text{ nm}/\text{‰}$ 。在海水温度、盐度双参数测量方面,Zhao 等^[32]提出了一种基于 C 型微结构的海水温盐传感器,其温度灵敏度和盐度灵敏度分别为 $-7.609 \text{ nm}/\text{°C}$ 和 $1.402 \text{ nm}/\text{‰}$; Sun 等^[33]提出了一种基于层状聚酰亚胺包覆 FBG 的海水温盐传感器,其温度灵敏度和盐度灵敏度分别为 $0.0321 \text{ nm}/\text{°C}$ 和 $-0.0358 \text{ nm}/\text{‰}$; Li 等^[34]提出了一种光纤表面等离子体共振海水温盐传感器,其温度灵敏度和盐度灵敏度分别为 $-2.02 \text{ nm}/\text{°C}$ 和 $0.31 \text{ nm}/\text{‰}$; Akter 等^[35]提出了一种基于双芯光子晶体光纤的海水温盐传感器,其温度灵敏度和盐度灵敏度最大分别为 $1000 \text{ pm}/\text{°C}$ 和 $200 \text{ pm}/\text{‰}$; Siyu 等^[36]提出了一种双通道表面等离子体共振海水温盐传感器,其温度灵敏度和盐度灵敏度分别为 $-0.956 \text{ nm}/\text{°C}$ 和 $0.3769 \text{ nm}/\text{‰}$ 。在测量海水温度、盐度、压强三参数方面,Zhao 等^[37]提出了一种表面等离子体共振的海水温盐压传感器,其温度、盐度和压强灵敏度分别为 $-1.802 \text{ nm}/\text{°C}$ 、 $0.560 \text{ nm}/\text{‰}$ 和 $2.838 \text{ nm}/\text{MPa}$ 。

上述研究基本都是在实验室内开展的,没有进入海试阶段。目前有望或已经进入海试阶段的主要为基于 FBG 结构发展的海水温压传感器,该传感器具有结构简单、解调方便、稳定性好等优势,如多个 FBG 串联的光纤 CTD、投弃式光纤温深仪以及上百个 FBG 级联的拖曳式温度链^[38]。虽然基于 FBG 的传感方法已在海洋调查中开始发挥作用,但其在传感灵敏度、多参数探测、空间分辨率等方面仍有进一步提升空间。相比传统电学方法及 FBG 传感器,基于微纳米光纤^[39]发展的传感器^[40]具有器件尺寸小、强倏逝场(可实现盐度较高的灵敏度传感,且可直接测得绝对盐度数据,无须根据电导率等数据进行反演)、灵敏度高(以温度传感为例,微

纳米光纤传感器的灵敏度比 FBG 传感器高 $1\sim 3$ 个数量级^[29]、响应速度快(响应速度与光纤直径成反比,光纤直径越小,响应速度越快^[41])以及可多参数同时测量等优点,在海水温度、盐度、压强传感及测量方面具有一定的优势和应用潜力。

本文主要针对可用于海水温度、盐度、压强传感及测量的干涉型微光纤传感器,从理论上介绍了微光纤传感器的传感原理及传播常数计算方法,并总结了可用于估算干涉型微光纤传感器灵敏度的通用表达式。然后介绍了微光纤的常用制备方法及典型干涉型微光纤传感器在海水温度、盐度、压强传感探测中的应用。考虑到这类传感器未来的实际应用环境为海水,重点介绍了典型器件的封装方法及其响应时间等性能,并在实际海洋中对封装后的器件进行了初步测试。最后,对目前研究中存在的问题及未来发展趋势进行了总结及展望。

2 传感原理与灵敏度的计算

2.1 微纳米光纤的传感原理和传播常数的计算

得益于较强的倏逝场效应^[39,42],微纳米光纤可实现高灵敏度传感。图 1 为海水中直径分别为 400 nm 和 1000 nm 微纳米光纤的基模(HE_{11} 模)坡印廷矢量,其中, X 、 Y 分别为光纤横截面的两个轴向^[43]。可以发现,随着光纤直径的增加,光纤的倏逝场逐渐减小。考虑到海水的特殊工作环境,一般在实验中采用直径大于 $1 \mu\text{m}$ 的光纤,以增加结构的稳定性,因此,需要权衡灵敏度与稳定性选取合适直径的微纳米光纤。由文献^[44-45]可知,微纳米光纤一般指直径在几十纳米到几微米之间的光纤,当光纤直径小于 $1 \mu\text{m}$ 时,可称为纳米光纤;直径超过 $1 \mu\text{m}$ 且在微米量级的光纤,也被称为微米光纤(下文简称为微光纤)。

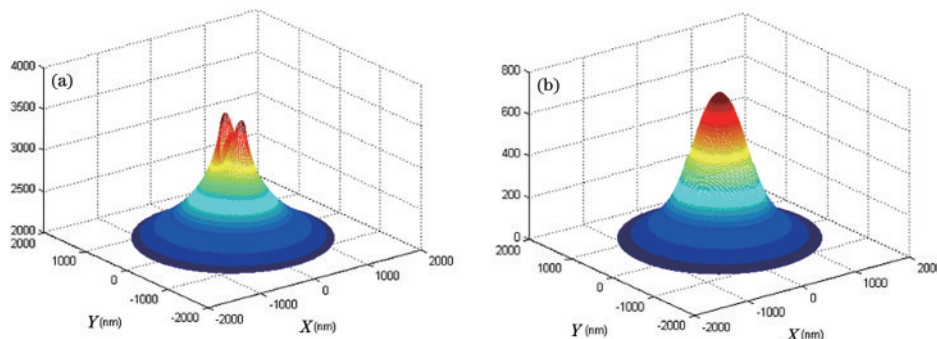


图 1 海水中微光纤 HE_{11} 模的坡印廷矢量。(a) 直径为 400 nm ; (b) 直径为 1000 nm ^[43]

Fig. 1 Poynting vector of the HE_{11} mode of the microfiber in seawater. (a) Diameter is 400 nm ; (b) diameter is 1000 nm ^[43]

由微光纤构造的干涉型器件用于海水的温度、盐度传感时,温度、盐度的变化会导致海水的折射率发生变化,即微光纤所处环境的折射率会发生变化。倏逝场的存在会导致微光纤的等效折射率 n_{eff} 发生变化,进而使干涉光谱的干涉峰发生移动或光强发生变化。对于用于压强传感的器件,当海水的压强发生变化时,光弹效应会使施加在微光纤上的力发生变化,进而导致微光纤折射率的变化。如果将微光纤包裹在弹性较大的材料中,材料的折射率也会发生变化,这表明微光纤自身及其所处环境的折射率均会发生变化,进而导致微光纤等效折射率

的变化以及干涉光谱干涉峰的移动。

微光纤等效折射率 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 的计算主要依赖于其传播常数 β 的计算,其中, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为光在真空中的波数, λ 为光的波长。图 2(a) 和图 2(b) 为计算海水中微光纤等效折射率的建模示意图,其中, d 为光纤的直径。理想条件下微光纤是一段折射率恒定、直径均匀且表面光滑的圆柱体,纤芯材料为 SiO_2 , 包层为无限大的海水。考虑到 SiO_2 自身具有的热光效应,其折射率需同时考虑 SiO_2 材料的色散和热光系数,可表示为^[46]

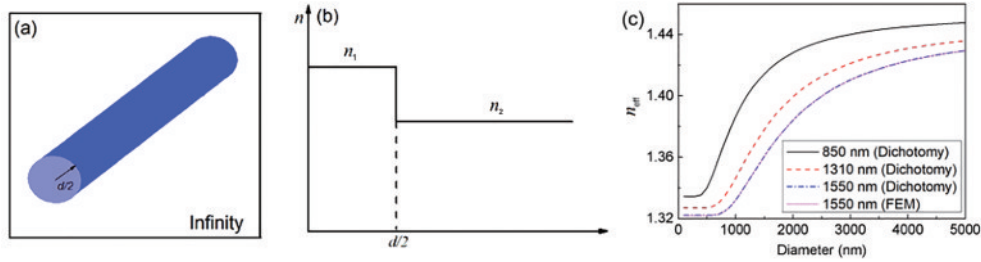


图 2 微光纤的结构。(a) SiO_2 微光纤的结构及参数;(b) 折射率分布图;(c) 等效折射率随光纤直径的变化曲线^[51]

Fig. 2 Structure of the microfiber. (a) Structure and parameters of the SiO_2 microfiber; (b) refractive index profile; (c) variation curve of effective refractive index with fiber diameter^[51]

$$n_1 = \sqrt{\frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} + 1 + (T - 20) \times 1.14 \times 10^{-5}}, \quad (1)$$

式中, T 为海水的温度。 n_1 中的第一项表示色散效应^[47], 第二项表示热光效应^[48]。同理,海水的折射率 n_2 不仅需要考虑海水本身的色散效应和热光效应,还要考虑海水盐度对海水折射率的影响,在纯水折射率公式上修正得到海水的折射率为^[46]

$$n_2 = \sqrt{\frac{3}{1-A} - 2 + 1.779 \times 10^{-4} S}, \quad (2)$$

式中, S 为海水的盐度(‰), A 为海水折射率关于探测波长 λ (μm) 及海水温度 T ($^\circ\text{C}$) 的函数,可参考文献^[49]给出。 n_2 中的第一项表示纯水本身的色散效应和热光效应,第二项表示海水折射率随盐度 S 的变化情况^[50]。

上述微光纤模型中光的传输可用麦克斯韦方程描述,由于光纤是各项同性介质,其内部不存在自由电荷和电流且无磁性,因此,可将麦克斯韦方程推导为模式场的亥姆霍兹方程,柱坐标系(光的传播方向为 z 方向)中的亥姆霍兹方程可表示为

$$(\nabla^2 + n^2 k_0^2 - \beta^2) \mathbf{E}(r, \phi) = 0, \quad (3)$$

$$(\nabla^2 + n^2 k_0^2 - \beta^2) \mathbf{H}(r, \phi) = 0, \quad (4)$$

式中, n 为介质的折射率(RI), \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为电场矢量和磁场矢量, r 和 ϕ 分别为模式场中的径向坐标和方位角坐标, ∇ 为微分算符。传播常数 β 可由亥姆霍兹方程的本征方程决定,本征方程可表示为

$$\left[\frac{1}{U} \frac{J'_m(U)}{J_m(U)} + \frac{1}{W} \frac{K'_m(W)}{K_m(W)} \right] \left[\frac{n_1^2}{U} \frac{J'_m(U)}{J_m(U)} + \frac{n_2^2}{W} \frac{K'_m(W)}{K_m(W)} \right] = m^2 \left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right) \left(\frac{n_1^2}{U^2} + \frac{n_2^2}{W^2} \right), \quad (5)$$

式中, J_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数, K_m 为 m 阶第二类修正贝塞尔函数, $U^2 = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) a^2$, $W^2 = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) a^2$, $V^2 = U^2 + W^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2$, a 为

微光纤的半径。利用上述本征方程可计算出微光纤中支持的混合模(HE模和EH模)、横电模(TE模)和横磁模(TM模)的传播常数。

求解本征方程中传播常数的方法主要有两种,一种是利用 Matlab 软件的数值求解方法即二分法(Dichotomy);另一种是利用 Comsol 软件的有限元法(FEM)进行建模求解。温度为 20 °C、盐度为 35 ‰时,几个典型波长下计算得到的 HE₁₁ 模 n_{eff} 随光纤直径的变化曲线^[51]如图 2(c)所示,其中, n_{eff} 主要由二分法计算得到。为了验证两种方法计算结果的差异,在 1550 nm 波长处的 n_{eff} 使用 FEM 求解。可以发现,两种方法得到的 n_{eff} 相同。还可以发现,在同一波长下,随着光纤直径的减小, n_{eff} 也在不断减小,且不断接近海水的折射率;当光纤直径低于某一阈值时, n_{eff} 等于的海水折射率,不再减小,且波长越短,该阈值越小。

2.2 干涉型微光纤传感器的通用灵敏度表达式

基于二分法和 FEM 求解的 n_{eff} , 可以对干涉型微光纤传感器的灵敏度进行定量评估^[51]。众所周知,微光纤干涉型传感器的基本原理是双光束干涉或多光束干涉,且由于收集光的方式不同(透射或反射),微光纤干涉型传感器的光谱形式也不同。但不同形式的光谱仍表现出较大的相似性,如光强随波长呈现周期性变化。在峰移传感机制中,仅需关注光强(I)极小值(极大值)的位置及其变化规律。对于微光纤干涉型传感器,光强极小值(极大值)的位置 λ_l 需满足的相位匹配条件可表示为

$$2\pi D_0/\lambda_l = K\pi, \quad (6)$$

式中,参数 K 具有不同的表达形式,由初始相位及光强极值决定; $2\pi D_0/\lambda_l$ 为相位差, D_0 为光程差,对于微光纤环形谐振腔(MRR), $2\pi D_0/\lambda_l$ 为绕 MRR 一周 L 产生的相位差,即 $D_0 = n_{\text{eff}}L$; 对于微光纤方向耦合器(MDC)或微光纤同轴 MZI(MMZI), $2\pi D_0/\lambda_l$ 为两个模式在长度为 L 的微光纤波导传播后产生的相位差,即 $D_0 = (n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}})L$, 其中, n_{eff1} 、 n_{eff2} 分别为两个模式的等效折射率。令 $\Delta n = n_{\text{eff}}$ 或 $\Delta n = n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}}$, 则 MRR、MDC 和 MMZI 光强极小值(极大值)的位置可统一表示为

$$2\pi \Delta n L/\lambda_l = K\pi. \quad (7)$$

以盐度传感为例,当盐度 S 发生变化时,光强极小值(极大值)的位置也会发生变化,对(7)式求微分,得到微光纤干涉型传感器的灵敏度为

$$S_s = \frac{\lambda_l}{\Delta n - \lambda_l \partial(\Delta n)/\partial \lambda_l} \cdot \frac{\partial(\Delta n)}{\partial S}. \quad (8)$$

从(8)式可以看出,微光纤干涉型传感器的灵敏度与探测波长和模式等效折射率及其对波长、盐度的变化率有关。而在相同的外界折射率条件下,

模式等效折射率取决于微光纤直径和波长,这表明微光纤干涉型传感器的灵敏度与探测波长和微光纤的直径相关。

3 微光纤的制备方法

在实验中构建可用于海水温度、盐度、压强传感的微光纤传感器时,获得高质量的微光纤是制备高性能微光纤传感器的前提。根据传感器的结构和传感机理,可将制备微光纤传感器所需的微光纤分为绝热拉锥微光纤和非绝热拉锥微光纤两种。

3.1 绝热拉锥微光纤的制备方法

相比非绝热拉锥光纤,绝热拉锥微光纤在拉锥过程中满足绝热条件,损耗较低,拉锥得到的微光纤透射率最高可达 99.7%^[52];且由于其腰区长度较长,可用于制备 MRR、MDC、微光纤双臂 MZI 等微光纤传感器。根据加热方法可将制备绝热拉锥微光纤的方法分为火焰加热法、CO₂ 激光加热法^[53-54]、电加热法^[55-56]。其中,火焰加热法可以采用酒精灯、氢氧焰作为加热源,加热过程中可进行手动拉伸或机械拉伸。手动拉伸方法主要有两步拉伸法、自调制拉伸法和块状玻璃直接拉伸法等^[39, 57-58],该方法制备的光纤表面光滑且控制灵活,但重复性较差、无法进行批量生产。机械拉伸方法的拉伸过程借助拉锥机的电控一维位移台实现,通过控制位移台的运动速度和加速度调整拉锥参数。

为了精确控制拉制出的光纤直径, Xu 等^[59]提出了一种精确控制拉锥微光纤直径的装置。该装置使用的激光器波长为 785 nm,用氢氧焰作为热源加热,气流量由气体流量控制器精确控制,以保证氢气火焰在拉锥过程中的气流稳定性;光纤的拉伸速度和拉伸距离由自动控制的一维位移台决定;光纤的透过率由一个功率计实时监测。当光源发出的光经跳线耦合进 SMF 时,除了基模 LP₀₁,光纤中还存在 LP₁₁、LP₂₁ 等高阶模式,随着拉锥过程中光纤直径的逐渐变小,这些模式会转化为横电模、横磁模以及混合模式。当拉锥腰部直径进一步降低时,横电模、横磁模会依次消失,表现为透过率的阶跃式下降。因此,可通过精确控制光透过率突变时刻的拉伸时间,精确控制拉锥直径。这种直径可控的微光纤制备方法对于批量制备微光纤传感器至关重要。

3.2 非绝热拉锥微光纤的制备方法

非绝热拉锥光纤在拉锥过程中会激发出高阶模,因此,利用基模与高阶模的模间干涉可制造基于 MMZI 的海水温盐压传感器。可通过手工或机械方式制备非绝热拉锥光纤,手工制备方法包括二步拉伸法^[60]和多步间歇式拉伸法^[61]。其中,二步拉伸法需先将 SMF 在熔接机中制造出一个陡峭的锥形结构,再用火焰拉伸法进一步缩小光纤的直径。多步间歇式拉伸法可将多模微纳光纤所需的大锥角非绝热锥区巧妙分散为很多微型非绝热锥区,如图 3(a)和图 3(b)所示。这种方法可以有效增加整个锥形区

域的长度,既能保证微纳光纤中多模的产生和保持,又减小了制备难度、增加了锥形区的稳固性。同时,通过控制拉伸过程中的参数,可灵活掌控微光纤的结构尺寸。机械制备非绝热光纤可以采用等离子电弧加热拉锥机的方法^[62],相比氢氧焰加热的拉锥机,等离子电弧加热时的加热区长度可以很小,因此很容易制备出非绝热光纤所需的大锥度锥区。图 3(c)为谢诚^[62]制造的便携式等离子电弧放电光纤拉锥机,通过调节电弧放电的强度、位移台的移动速度等因素调整拉锥参数,从而得到具有不同锥区形状和腰区直径的非绝热微光纤。

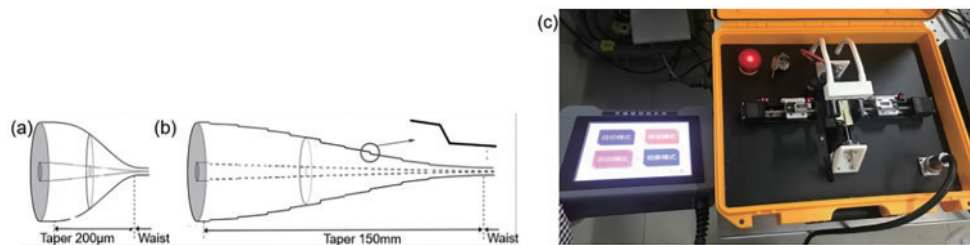


图 3 非绝热拉锥方法的示意图。(a)二步拉伸法;(b)多步间歇式拉伸法;(c)基于等离子电弧放电的光纤拉锥机^[61-62]

Fig. 3 Schematic diagram of the non-adiabatic tapering method. (a) Two-step drawing method; (b) multi-step intermittent drawing method; (c) optical fiber tapering machine based on plasma arc discharge^[61-62]

4 典型干涉型微光纤海水温盐压传感器

利用上述方法制备的绝热拉锥微光纤可以制备 MRR、MDC、微光纤双臂 MZI 等微光纤传感器,利用非绝热拉锥光纤可以制备 MMZI 传感器,不同传感器具有不同的传感特性以及合适的应用场合。

4.1 微光纤环形谐振腔

4.1.1 基于微光纤环形谐振腔的海水温传感器

Jiang 等^[63]提出并演示了一种微光纤结型环形谐振腔(MKR),除结型环形腔外,还有 Loop 型、coil 型等形式^[64-65]。Xu 等^[66-68]分别利用 MRR 进行酒精、甘油、异丙醇、甲醇等液体折射率的传感,但这些液体中并未包含海水。Wang 等^[69]利用图 4(a)中的微光纤 Loop 型环形谐振腔实现了海水折射率和盐度的传感,并估算了传感器所能达到的灵敏度,如在不同波长下海水折射率传感灵敏度(S_n)随微光纤直径(d)的变化情况,结果如图 4(b)所示。其中, D 为环形腔的直径, E_{in} 为输入光强, E_{out} 为输出光强。Yang 等^[70]演示了基于 MKR 峰移机制的海水温传感器,其透射光谱随海水温度的变化情况如图 4(c)所示,实测传感灵敏度约为 $22.81 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。此外,还分析了两个偏振模式对谐振光谱特性的影响^[71]。

Yang 等^[72]提出了一种基于强度变化的 MKR 海水温度传感方法,并估算了其传感灵敏度和温度的动态范围,图 4(d)为不同海水温度下 MRR 的光谱。为了将单点海水传感扩展到多点,Yang 等^[73]利用图 4(e)中两个串联的双环实现了两点海水温度测量,实验测得两个环的灵敏度如图 4(f)所示。其中,ASE 为宽带激光光源,OSA 为光谱仪。为了进一步提高传感器的灵敏度,用聚合物光纤拉锥制成 MKR,获得的传感器灵敏度约为 SiO_2 材料制成的 MRR 的 2 倍^[43]。为了屏蔽盐度对温度测量的影响,Yang 等^[74]提出了对盐度不敏感的镀膜 MKR 传感器,当镀膜厚度为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 时,盐度对温度的测量没有影响。

4.1.2 基于微光纤环形谐振腔的海水盐度传感器

在海水盐度传感方面,Liao 等^[75]演示了基于 MKR 峰移机制的海水盐度传感器,得到不同盐度下的光谱如图 5(a)所示,其传感灵敏度约为 $21.18 \text{ pm}/\text{‰}$ 。此外,该课题组还对实验光谱的分裂现象进行了分析,并测试了不同谐振峰的传感灵敏度^[76],图 5(b)为输入椭圆偏振光时不同盐度 S 下的归一化透射光谱。为了避免盐度传感与温度传感间的交叉灵敏度,Li 等^[77]提出了对温度不敏感的镀膜 MRR 传感器,计算中的镀膜材料分别采用了氟化镁和聚四氟乙烯。图 5(c)为 980 nm 波长下不同镀膜厚度时环

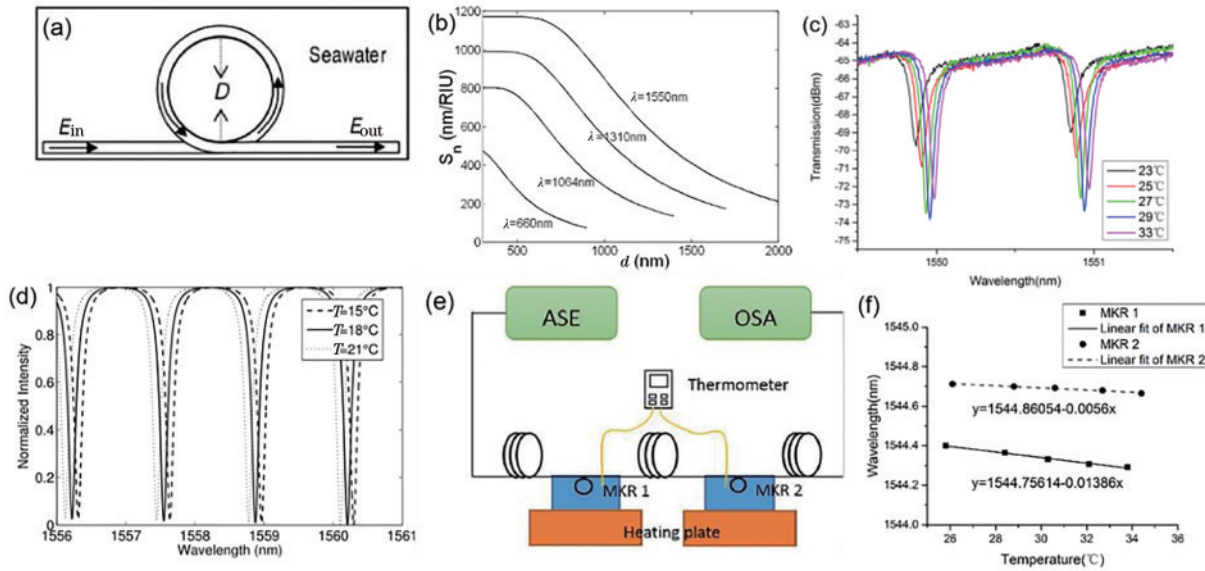


图 4 基于 MRR 的海水温度传感器。(a) 微光纤 Loop 型环形谐振腔^[69]；(b) MRR 的折射率灵敏度随光纤直径的变化曲线^[69]；(c) 峰移传感机制下 MRR 的光谱^[70]；(d) 强度传感机制下 MRR 的光谱^[72]；(e) 两点海水温度测量系统的示意图^[73]；(f) 谐振波长随海水温度的变化曲线^[73]

Fig. 4 Seawater temperature sensor based on MRR. (a) Microfiber Loop type ring resonator^[69]; (b) variation curve of the refractive index sensitivity of the MRR with the fiber diameter^[69]; (c) spectrum of the MRR under the peak shift sensing mechanism^[70]; (d) spectrum of the MRR under the intensity sensing mechanism^[72]; (e) schematic diagram of the two-point seawater temperature measurement system^[73]; (f) variation curve of the resonance wavelength with the seawater temperature^[73]

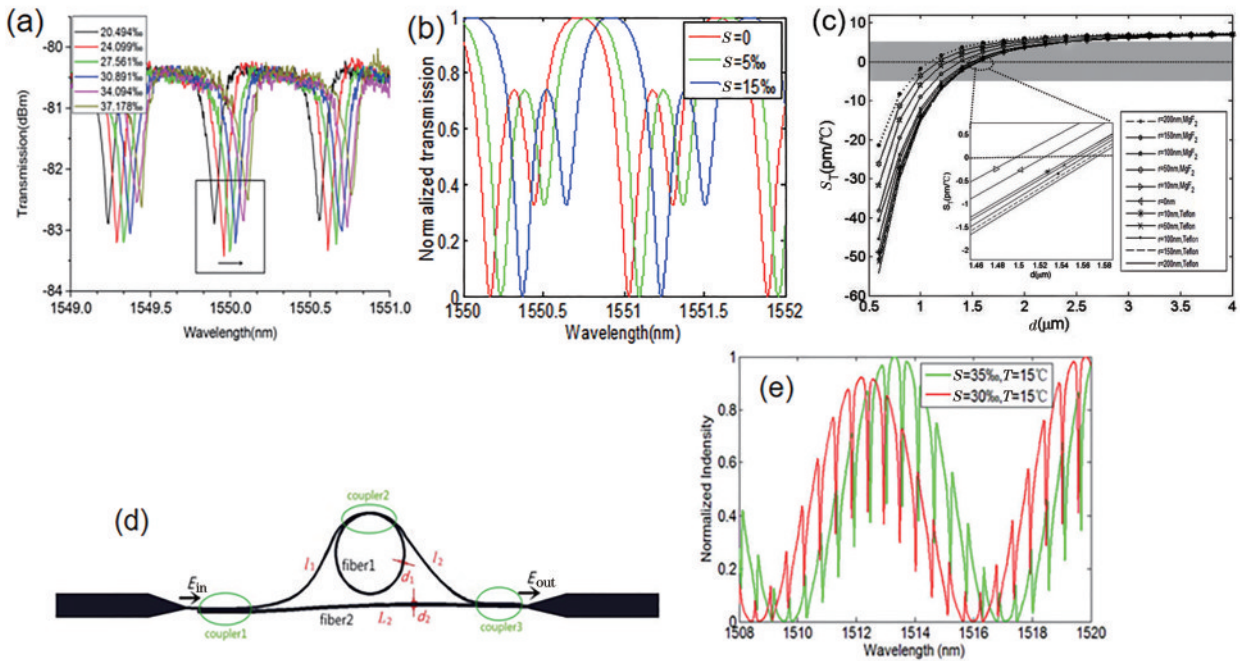


图 5 基于 MRR 的海水盐度传感器。(a) 峰移机制下的实验光谱^[75]；(b) 输入椭圆偏振光时的归一化透射光谱^[76]；(c) 温度灵敏度随微光纤环直径的变化曲线^[77]；(d) 带有谐振腔的微光纤双臂 MZI^[78]；(e) 不同盐度下的透射光谱^[78]

Fig. 5 Seawater salinity sensor based on MRR. (a) Experimental spectrum under the peak shift mechanism^[75]; (b) normalized transmission spectrum when elliptically polarized light is input^[76]; (c) variation curve of temperature sensitivity with the diameter of microfiber ring^[77]; (d) microfiber dual-arm MZI with resonator cavity^[78]; (e) transmission spectra under different salinities^[78]

腔温度灵敏度随波长的变化函数,插图温度为温度灵敏度 $S_T=0$ 附近 7 个不同镀膜厚度的曲线放大图。可以发现,当选取合适的镀膜厚度时,外界环境的温度变化对盐度传感的影响几乎可以忽略。当不能避免测试过程中的温度变化时,有必要实现温度、盐度的同时传感,因此, Liao 等^[78]将微光纤环形腔置于双臂 MZI 的一个臂内,如图 5(d)所示。其中,两传输臂的长度分别为 l_1+l_2 和 L_2 ,光纤直径分别为 d_1 和 d_2 ,该传感器可同时实现温度和盐度的高灵敏度传感。图 5(e)为不同盐度 S 下该传感器的理论计算光谱图,实验测得的盐度和温度最高灵敏度分别为 208.63 pm/‰ 和 -112.33 pm/°C。

4.2 微光纤方向耦合器

Zhu 等^[79-80]通过缠绕两根微纳光纤制成了耦合器液体折射率传感器,在强度和峰移传感机制下的液体折射率传感灵敏度分别为 26.96 mW/RIU 与 2735 nm/RIU (RIU 为折射率单位),该缠绕结构易

于制作且损耗较低。Bo 等^[81]基于熔接的两根 SMF 制备了基于微光纤耦合器(OMC)的液体折射率传感器,其折射率灵敏度为 2723 nm/RIU,最高可达到 4155 nm/RIU,远高于 MRR 的探测灵敏度。Wang 等^[82]提出了基于聚酰亚胺覆盖的微纳米光纤(Polyimide-coated MNFs)方向耦合器温盐传感器,实验结构如图 6(a)所示,其中, Dip 表示观察的光谱波谷。Wang 等^[83]利用图 6(b)中的类似结构在实验中演示了海水温度、盐度的同时传感,得到不同温度、不同盐度的实验光谱,如图 6(c)、图 6(d)所示,实测的温度、盐度灵敏度分别为 -1130 pm/°C 和 930 pm/‰,其中, Port 表示不同的输入输出端口。Yu 等^[84]测量了 OMC 在海水温度、盐度、压强传感中的传感灵敏度,其实验系统如图 6(e)所示,测得的温度、盐度和压强灵敏度分别为 -2326 pm/°C, 1596 pm/‰ 以及 169 pm/MPa。这类传感器的成本低、灵敏度较高,但制作工艺复杂且不易封装。

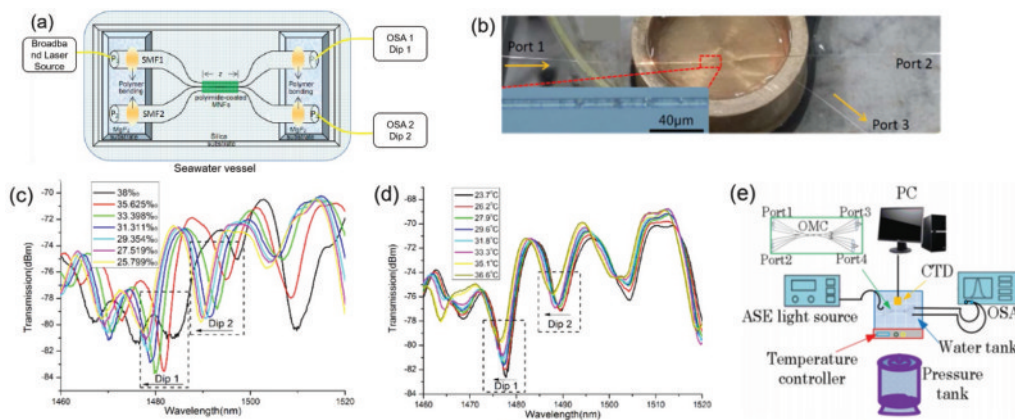


图 6 MDC 的实验结果。(a)海水温盐传感器的示意图^[82]; (b)海水温盐传感器的实验装置^[83]; (c)不同盐度下耦合器的透射光谱^[83]; (d)不同温度下耦合器的透射光谱^[83]; (e)海水温盐压传感器的实验装置^[84]

Fig. 6 Experimental results of the MDC. (a) Schematic diagram of seawater temperature and salinity sensor^[82]; (b) experimental device of seawater temperature and salinity sensor^[83]; (c) transmission spectra of the coupler under different salinities^[83]; (d) transmission spectra of the coupler at different temperatures^[83]; (e) experimental device for seawater temperature, salinity and pressure sensor^[84]

4.3 微光纤同轴马赫-曾德尔干涉仪

4.3.1 微光纤同轴马赫-曾德尔干涉仪单参数传感器

MMZI是实现高灵敏度且容易封装的理想传感器结构,Wang 等^[85]基于非绝热拉锥微光纤制备方法得到了一种特殊的 MMZI 结构,并利用该结构实现了海水盐度的高灵敏度传感,其结构如图 7(a)所示,灵敏度约为 2938.16 pm/‰。为了将这种基于模间干涉的 MMZI 推广到普通 SMF 以及其他水溶液环境中, Liao 等^[86]提出了一种具有超高灵敏度的同轴 MZI 传感器灵敏度优化方案,该方法对折射率和硝酸盐的传

感灵敏度分别为 1.26×10^5 nm/RIU 和 14.95 pm/ppm (ppm 为浓度单位,即 10^{-6}),这是目前同类传感器中的最高灵敏度结果之一,图 7(b)为 25 °C 时不同光纤直径 MMZI 能达到的灵敏度水平。在此基础上, Yang 等^[46]利用色散转折点(DTP)附近的超高灵敏度对海水中含量很低的硝酸盐实现了传感探测,图 7(c)为微光纤直径为 3.46 μm 时不同浓度硝酸钠溶液中的透射光谱,该结构达到的硝酸钠浓度探测最大灵敏度和最低探测极限分别为 5.98 pm/ppm (灵敏度约 50396.09 nm/RIU)和 0.17 ppm。

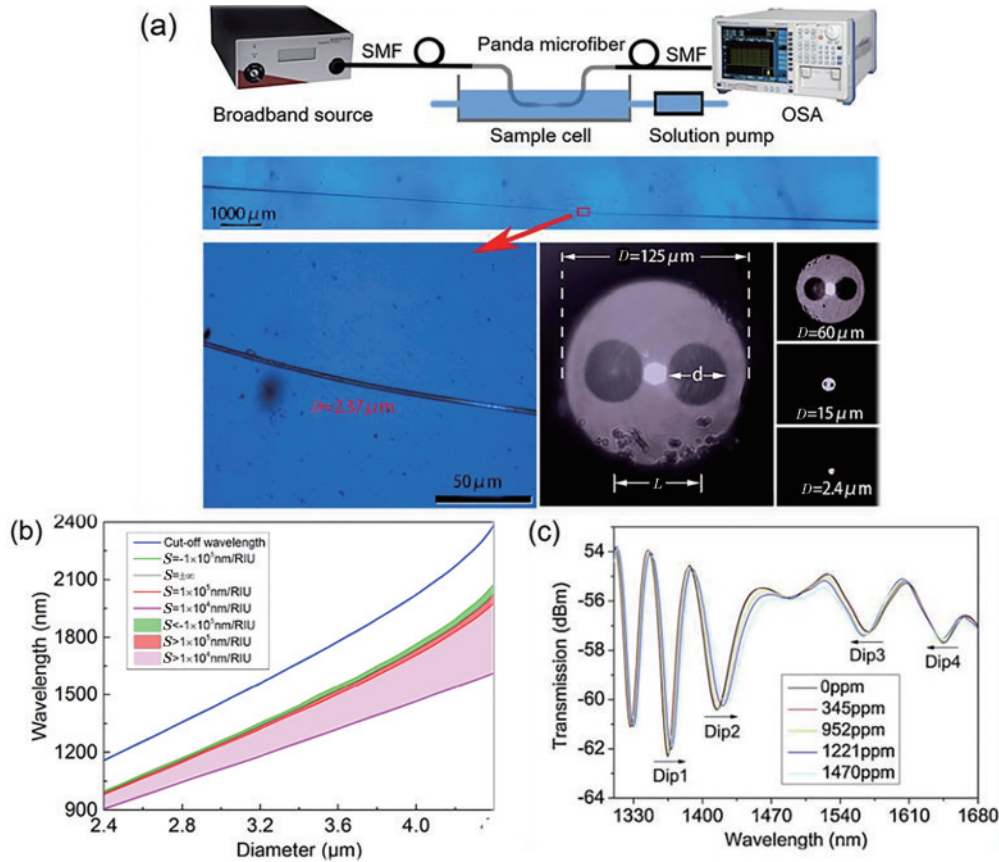


图 7 MMZI 单参数传感器的结构。(a) MMZI 传感器的示意图及传感区域的显微图像^[85]；(b) 25 °C 时 MMZI 的灵敏度^[86]；(c) 微光纤直径为 3.46 μm 时硝酸钠溶液的透射光谱^[87]

Fig. 7 Structure of the MMZI single parameter sensor. (a) Schematic diagram of the MMZI sensor and the microscopic image of the sensing area^[85]; (b) sensitivity of the MMZI at 25 °C^[86]; (c) transmission spectrum of sodium nitrate solution when the diameter of the microfiber is 3.46 μm^[87]

4.3.2 微光纤同轴马赫-曾德尔干涉仪双参数传感器

上述单参数传感都是基于海水折射率变化实现的,而实际海水的温度、盐度变化都可能导致海水折射率发生变化,因此, Liu 等^[87]结合细芯光纤和 SMF 熔接并对熔接区进行拉锥,实现了一种可同时测量海水温度和盐度的方法。首先,在两段 SMF 中熔接一段细芯光纤(Nuferm 公司,型号: 1060-XP)。然后,用酒精灯加热并对两个熔接点进行拉锥,如图 8(a)所示,其中, taper 表示拉锥区域。一个熔接点拉锥区域的直径较大,只对温度敏感,可以起到温度补偿功能;另外一个熔接点拉锥区的光纤直径较小,对温度和盐度均敏感,可以实现温度、盐度的同时传感。此外,由于两个拉锥区域均为非绝热拉锥,因此,会在第一个拉锥区域激发出高阶模,这些高阶模在细芯光纤中进行干涉,且高阶模中的 HE₁₂ 模也会在第二个拉锥区域中与基模 HE₁₁ 进行干涉,导致该结构的透射光谱中产

生两套干涉谱,从而实现双参数传感,其典型透射光谱如图 8(b)所示。图 8(c)为不同盐度下经高频滤波处理后的透射光谱图,从光谱中提取两个典型干涉峰进行追踪,可实现温度、盐度的同时传感,实测灵敏度分别为 -994.83 pm/°C 和 290.47 pm/‰。考虑到真实海水中不同深度处的压强不同,还需实现温度或盐度随压强变化的传感。以温度随压强的变化为例, Hou 等^[88]提出了一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)封装的 MMZI 结构,可对液体的温度和压强进行同时测量。用模拟软件对传感器施加压强,得到压强为 1 MPa 时光纤内的压强分布如图 8(d)所示。该结构采用 PDMS 进行封装,原因是该聚合物同时具有很大的热光系数和弹性模量,可大大提高温度和压强的传感灵敏度,实验测得的灵敏度分别为 -7.41 nm/°C 和 13.31 nm/MPa。图 8(e)、图 8(f)分别为不同压强下的透射光谱和不同温度下两个干涉峰的波长随温度的变化曲线,

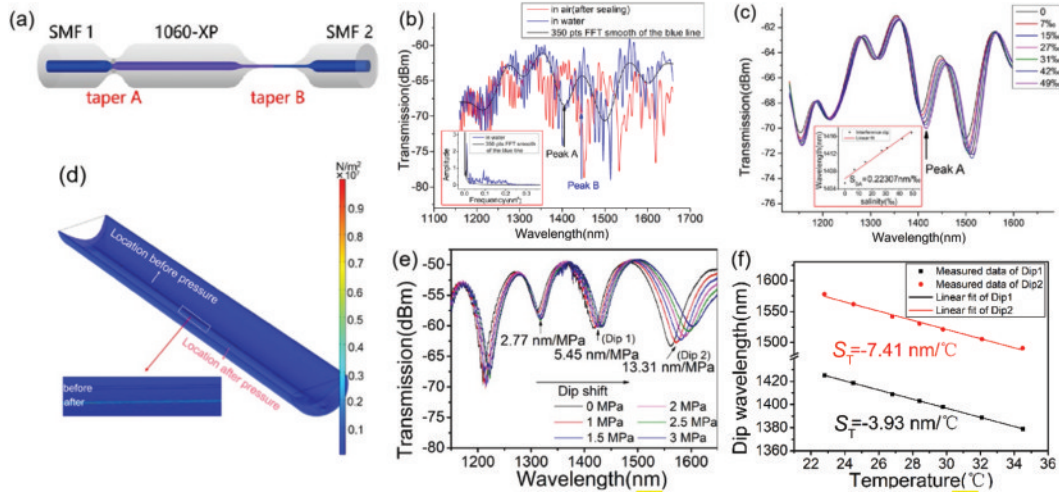


图 8 MMZI 双参数传感器的结构。(a)传感器的结构^[87];(b)传感器的典型透射光谱^[87];(c)高频滤波后的透射光谱^[87];(d)压力为 1 MPa 时传感器的压力分布^[88];(e)不同压强下的透射光谱^[88];(f)干涉峰波长随温度的变化曲线^[88]

Fig. 8 Structure of the MMZI dual-parameter sensor. (a) Structure of the sensor^[87]; (b) typical transmission spectrum of the sensor^[87]; (c) transmission spectrum after high frequency filtering^[87]; (d) pressure distribution of the sensor when the pressure is 1 MPa^[88]; (e) transmission spectra under different pressures^[88]; (f) variation curve of interference peak wavelength with temperature^[88]

这是目前为数不多的能同时实现温度、压强且具有较高灵敏度的传感结果之一。对上述两种 MMZI 进行优化和设计后,有望实现温度、盐度、压强的同时传感及测量。

MRR、MDC、MMZI 的优势、传感应用对象、传感灵敏度、光谱特征、制作和封装难易程度如表 1 所示,其中, P 为压强, S_T 、 S_S 、 S_P 分别为温度灵敏度、盐度灵敏度和压强灵敏度, FSR 为自由光谱范围。

表 1 三种微光纤传感器的性能参数
Table 1 Performance parameters of three kinds of microfiber sensors

Type	Advantage	Sensitive parameter	$S_T / (\text{pm} \cdot \text{°C}^{-1})$	$S_S / (\text{pm} \cdot \text{‰}^{-1})$	$S_P / (\text{pm} \cdot \text{MPa}^{-1})$	FSR	Fabrication difficulty
MRR	compact size low cost	T and S	$5.24^{[71]}-197^{[74]}$	$21.18^{[75]}-208.63^{[78]}$	-	small	medium
MDC	high sensitivity, multi-port	T , S and P	$-1130^{[83]}-2326^{[84]}$	$-1030^{[82]}-1596^{[84]}$	$\sim 169^{[84]}$	medium	difficult
MMZI	high sensitivity, coaxial structure	T , S and P	$-7410^{[88]}-406^{[89]}$	$290.47^{[88]}-938.16^{[85]}$	$\sim 13310^{[88]}$	large	easy

5 微光纤传感器的封装及关键性能测试

5.1 微光纤传感器的封装

为了将微光纤传感器应用于海洋探测等特殊环境,有必要开展微光纤传感器的封装研究,并对封装后的微光纤传感器环境适应性进行评估。目前,针对光纤的封装研究大多集中在 FBG 的封装方面, Wang 等^[83]将乙基纤维素溶液(EC drop)涂抹在 MDC 的耦合区,对其进行加固,如图 9(a)所示。该方法虽然可以在范德华力的基础上使两根微光纤之间的粘合更紧密,但对整个器件不具备支撑作用。因此, Li 等^[89]提出了 U 型金属支撑架,可实现 MMZI 的悬空支撑,如图 9(b)所示。为了进一步加

固微光纤器件、抵抗海洋环境中的浪流冲击, Liu 等^[87]和 Hou 等^[88]分别提出了利用 C 型不锈钢管结合聚合物材料的半封装结构和全封装结构,如图 9(c)和图 9(d)所示。这两种封装方式都可以在一定程度上保护 MMZI,区别在于半封装方式可以裸露出微光纤最细处,以进行高灵敏度的盐度传感;而全封装结构可以借助于聚合物材料实现高灵敏度的温度和压强同时传感。根据不同的应用场合可以选择不同的封装结构,还可以在此基础上采用铠装金属网等加固方式。

5.2 微光纤传感器的环境适应性

为了评估上述封装方法的效果,分别从长期工作性、抗振性、海试等几个方面对封装后的微光纤传感器进行评估。首先,在一段较长时间内持续测试

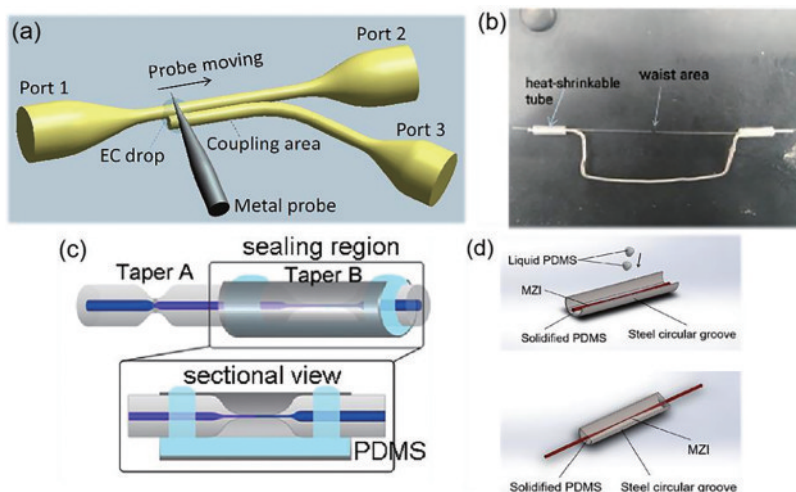


图 9 微光纤传感器的封装。(a)利用探针涂覆乙基纤维素的示意图^[83]；(b) U型金属架支撑的MMZI^[89]；(c)半封装加固结构^[87]；(d)全封装加固结构^[88]

Fig. 9 Package of the microfiber sensor. (a) Schematic diagram of using probe to coat ethyl cellulose^[83]; (b) MMZI supported by U-shaped metal frame^[89]; (c) semi-encapsulated reinforcement structure^[87]; (d) fully-encapsulated reinforcement structure^[88]

传感器的透射光谱,以反映其长期工作性,图 10(a)为在一年内对放置于水中半封装的 MMZI 透射光谱。可以发现,除了在不同季节有不同的温度漂移,光谱形状基本保持不变,反映了其良好的长期工作性。为了测试传感器的抗振性,对比了有无机械振动(频率约几十赫兹)两种场景下的透射光谱,如图 10(b)所示。可以发现,振动对光强有一定影响,

但对于干涉峰的位置并没有影响。为了进一步探究振动对光强的影响,测试了传感器在典型频率(如 30 Hz)下某单色光光强的变化情况,结果如图 10(c)所示^[89]。可以发现,传感器在水中受振动的影响远小于空气中。最后,在海上对微光纤传感器的环境适应性进行测试,图 10(d)为将 MMZI 安装在投弃式探头后布放于真实海水(南海海试)中的照片,通过

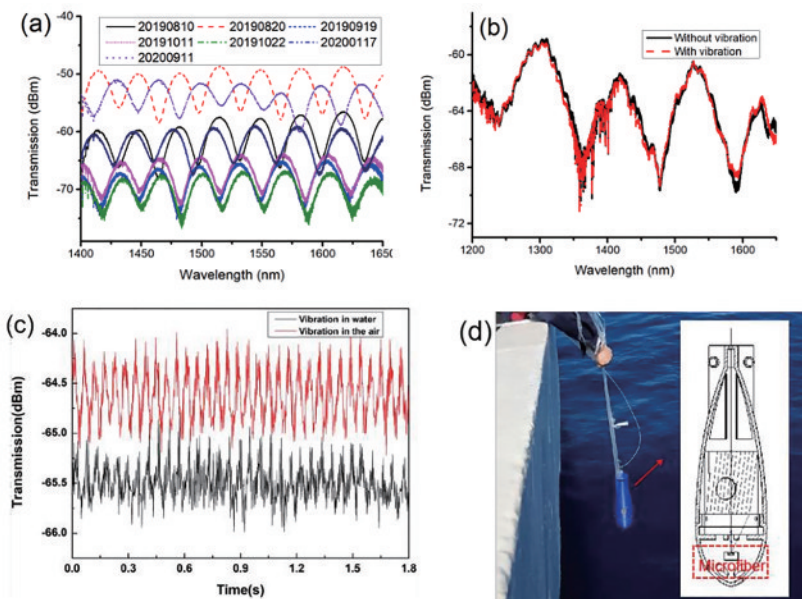


图 10 微光纤传感器的环境适应性。(a)长期工作性能的测试结果；(b)振动对透射光谱的影响；(c) 30 Hz 振动对单波长光强的影响；(d)装有 MMZI 的投弃式探头海试照片^[89]

Fig. 10 Environmental adaptability of the microfiber sensor. (a) Long-term performance test results; (b) effect of vibration on the transmission spectrum; (c) effect of 30 Hz vibration on single-wavelength light intensity; (d) sea trial photos of disposable probes equipped with MMZI^[89]

追踪从光纤中传输回的光谱信号获得数据。结果表明,探头从海表面自由落落到海表面下几百米的范围内反射光谱信号都能保持原有的形状和强度,这反映了微光纤传感器在实际海水中的短期良好适应性。

5.3 微光纤传感器的响应时间

考虑到微光纤传感器,特别是易于封装且灵敏度较高的 MMZI 在海洋探测领域中的潜在应用,尤其是一些快速变化过程如湍流测量中的应用,必须对该类传感器的响应时间进行研究。以温度传感为例,Wen 等^[90]对 U 型金属架封装的 MMZI 在温度传感中的响应时间进行了详细研究,1580 nm 波长下该结构的响应曲线如图 11(a)所示,其中, I 为传感器在 50.1 °C 水中的输出光强, I_0 为传感器在 25.6 °C 空气中的输出光强,实验测得该结构在温度传感时的最快响应时间约为 13.1 ms,响应速度比 FBG 快 1 倍。

此外,还研究了影响响应时间的多个因素,如换热系数、光纤直径、周围环境温度、使用的测量仪器。结果表明,环境的换热系数越大,光纤直径越小,响应速度越快;周围环境温度对响应速度的影响不大;不同测量仪器也会使测量结果有所差异。最后,给出了时间常数和响应时间的关系。除 U 型金属架外,当 MMZI 采用其他封装方式后,也会对响应时间产生不同的影响,Liu 等^[87]的测试结果表明,利用 C 型钢槽半封装(裸露微光纤最细部分作为接触式传感)后,实测传感器盐度传感的响应时间约为 33 ms,如图 11(b)所示;Hou 等^[88]的测试结果表明,利用 C 型钢槽全封装后的温度传感响应时间约为 1.13 s,压强传感响应时间约为 286 ms,如图 11(c)所示。这表明封装虽然可以一定程度上起到加固传感结构、增强稳定性的作用,但也会对响应时间产生较大影响。

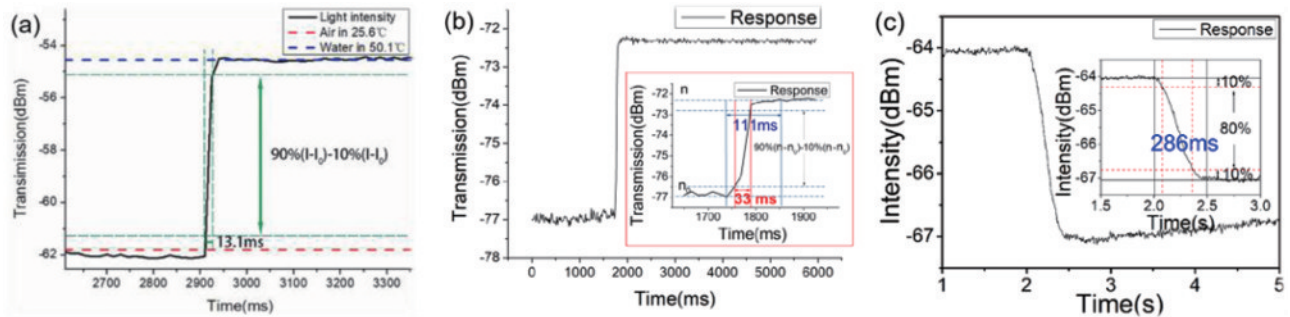


图 11 不同微光纤传感器的响应时间。(a) U 形金属架封装结构的输出响应时间^[90]; (b) C 型钢槽半封装结构的响应时间^[87]; (c) C 型钢槽全封装结构的响应时间^[88]

Fig. 11 Response time of different microfiber sensors. (a) Output response time of U-shaped metal frame package structure^[90]; (b) response time of C-shaped steel channel semi-encapsulated structure^[87]; (c) response time of C-shaped steel channel

6 结 论

目前,国内外在光纤传感及应用方面已取得了一系列进展,基于微光纤发展的干涉型海水温度、盐度、压强传感器件也为开发面向海洋探测等领域的光学传感器提供了一种成本低、体积小、灵敏度高、响应快的新方法,但微光纤在海洋探测领域中的发展也面临着诸多挑战。从实用化角度来看,要想真正将这些结构用于未来的海洋探测中,还需进一步发展微光纤的有效封装方法。原因是在恶劣的海洋环境中,封装质量直接决定了传感结构的工作稳定性,这也是保障被解调信号真实性的重要因素。此外,外部封装必然会降低响应速度,如何平衡封装与响应时间的关系还有待进一步研究。在有效封装的基础上,多参数解调也是一个亟待解决的问题,器件

具有的高灵敏度以及温度、盐度、压强三个参数之间的相互耦合,导致三个参数之间可能存在交叉灵敏度,特别是对于干涉型器件,在假设无外界扰动引起峰移的前提下(依赖于良好的封装),其谐振峰移量可能是由温度、盐度、压强三个参数的变化共同决定的。因此,发展多参数解调方法对于微光纤在多变量传感领域中的应用至关重要。在未来研究中,基于微光纤发展的干涉型传感器将为海洋探测提供一种低成本、高灵敏度且可抗电磁干扰的新型光学方法。除温度、盐度、压强这三个参数外,还有望将微光纤传感器应用于海水的流速传感、低浓度成分(如硝酸盐)以及声波传感等方面,进而发展基于微光纤的投弃式海水温盐深剖面测量、光纤水听器、湍流以及海洋内波等新型测量方法。此外,上述干涉型微光纤传感器除了可用于海水中的温度、盐度、压强传

感外,也可用于气体环境的温度、压强传感以及其他液体的折射率传感等领域,其封装结构也可以为微光纤在应力、弯曲、湿度、磁场、液面等传感领域的应用提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] Bi Y L, Sun Y, Huang M T, et al. Progress and prospects of hydrographic surveying technology[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(3): 65-70.
毕永良, 孙毅, 黄谟涛, 等. 海洋测量技术研究进展与展望[J]. *海洋测绘*, 2004, 24(3): 65-70.
- [2] Fan H B, Peng A, Qi M M. Research on expendable seawater conductivity measurement system[C]// 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, July 5-7, 2010, Dalian, China. New York: IEEE Press, 2010: V1-115-V1-118.
- [3] Zhang L, Ye S, Zhou S D, et al. Review of measurement techniques for temperature, salinity and depth profile of sea water[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(5): 481-489.
张龙, 叶松, 周树道, 等. 海水温盐深剖面测量技术综述[J]. *海洋通报*, 2017, 36(5): 481-489.
- [4] SeaBird of norway, our kayaks[EB/OL]. [2020-12-20]. <https://seabirddesigns.com>.
- [5] Goes M, Goni G, Dong S F. An optimal XBT-based monitoring system for the South Atlantic meridional overturning circulation at 34°S[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(1): 161-181.
- [6] Huang T Y, Shao X G, Wu Z F, et al. A sensitivity enhanced temperature sensor based on highly germania-doped few-mode fiber[J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 53-57.
- [7] Ma L, Kang Z X, Qi Y H, et al. Fiber-optic temperature sensor based on a thinner no-core fiber[J]. *Optik*, 2015, 126(9/10): 1044-1046.
- [8] Li B W, Liu Y G, Song X Y, et al. High-sensitivity temperature sensor based on ultraviolet glue-filled silica capillary tube[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(16): 1327-1333.
- [9] Liu Y D, Jing X L, Chen H L, et al. Highly sensitive temperature sensor based on Sagnac interferometer using photonic crystal fiber with circular layout[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314: 112236.
- [10] Zhu J J, Zhang A P, Xia T H, et al. Fiber-optic high-temperature sensor based on thin-core fiber modal interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(9): 1415-1418.
- [11] Tan Z, Liao C R, Liu S, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206007.
- [12] Dong H Y, Liu C N, Sun S M, et al. Optical fiber high-temperature and refractive index sensor fabricated by femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170633.
董航宇, 刘昌宁, 孙四梅, 等. 飞秒激光制作的光纤高温和折射率传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170633.
- [13] Zong S Y, Wen X Y, Zhang D S. Mach-Zehnder interferometer based on fiber core mismatch and core-offset splicing for the simultaneous sensing of temperature and refractive index[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170607.
宗书尧, 文晓艳, 张东生. 基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 170607.
- [14] Zhou X, Li S G, Li X G, et al. High-sensitivity SPR temperature sensor based on hollow-core fiber[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10): 8494-8499.
- [15] Wu C, Guan B O, Lu C, et al. Salinity sensor based on polyimide-coated photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20003-20008.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Zhang W T, Li F, Liu Y L, et al. Ultrathin FBG pressure sensor with enhanced responsivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(19): 1553-1555.
- [19] Song D C, Wei Z X, Zou J L, et al. Pressure sensor based on fiber Bragg grating and carbon fiber ribbon-wound composite cylindrical shell[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(7): 828-831.

- [20] Hou M X, Wang Y, Liu S H, et al. Sensitivity-enhanced pressure sensor with hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(23): 4637-4641.
- [21] Tang J, Yin G L, Liao C R, et al. High-sensitivity gas pressure sensor based on Fabry-Pérot interferometer with a side-opened channel in hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-7.
- [22] Zhang Z, Liao C R, Tang J, et al. High-sensitivity gas-pressure sensor based on fiber-tip PVC diaphragm Fabry-Pérot interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(18): 4067-4071.
- [23] Lin C M, Liu Y C, Liu W F, et al. High-sensitivity simultaneous pressure and temperature sensor using a superstructure fiber grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(3): 691-696.
- [24] Bai Y L, Qi Y H, Dong Y, et al. Highly sensitive temperature and pressure sensor based on Fabry-Perot interference[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2471-2474.
- [25] Dong N N, Wang S M, Jiang L, et al. Pressure and temperature sensor based on graphene diaphragm and fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(5): 431-434.
- [26] Zhang L C, Jiang Y, Gao H C, et al. Simultaneous measurements of temperature and pressure with a dual-cavity Fabry-Perot sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 106-109.
- [27] 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.
- [28] Wang X, Wang J, Wang S S, et al. Simultaneous measurement of dual-points seawater temperatures using highly-birefringent elliptical-core fibers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 170-174.
- [29] Liu T Q, Wang J, Liao Y P, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for tunable two quasi-continuous points' temperature sensing in seawater[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12277-12290.
- [30] Yang F, Hlushko R, Wu D, et al. Ocean salinity sensing using long-period fiber gratings functionalized with layer-by-layer hydrogels[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(1): 2134-2141.
- [31] Mollah M A, Yousufali M, Faysal R B A M, et al. Highly sensitive photonic crystal fiber salinity sensor based on Sagnac interferometer[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 103022.
- [32] Zhao Y, Wu Q L, Zhang Y N. Theoretical analysis of high-sensitive seawater temperature and salinity measurement based on C-type micro-structured fiber[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 258: 822-828.
- [33] Sun M Y, Jiang H T, Shi B, 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.
- [34] Li H, Qian X L, Zheng W L, et al. Theoretical and experimental characterization of a salinity and temperature sensor employing optical fiber surface plasmon resonance (SPR)[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2020, 48(6): 601-615.
- [35] Akter S, Ahmed K, El-Naggar S A, et al. Highly sensitive refractive index sensor for temperature and salinity measurement of seawater[J]. *Optik*, 2020, 216: 164901.
- [36] Siyu E, Zhang Y N, Han B, et al. Two-channel surface plasmon resonance sensor for simultaneous measurement of seawater salinity and temperature[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7191-7199.
- [37] 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.
- [38] Wang Y J, Wang J F, Ren Q, et al. Application of optical fiber temperature and pressure sensor in physical oceanography[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1480-1487.
王永杰, 王建丰, 任强, 等. 光纤温深传感器在物理海洋的应用[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(6): 1480-1487.
- [39] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816-819.
- [40] Lou J Y, Tong L M, Ye Z Z. Modeling of silica nanowires for optical sensing[J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 2135-2140.
- [41] Rinaudo P, Paya-Zaforteza I, Calderón P, et al. Experimental and analytical evaluation of the response time of high temperature fiber optic sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 243: 167-174.
- [42] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1025-1035.

- [43] Yang H J. The experimental study on seawater temperature sensing based on microfiber knot resonator [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2017.
杨红绢. 微光纤环形谐振腔海水温度传感实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2017.
- [44] Tong L M, Zi F, Guo X, et al. Optical microfibers and nanofibers: a tutorial[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(23): 4641-4647.
- [45] Lou J Y, Wang Y P, Tong L M. Microfiber optical sensors: a review[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 5823-5844.
- [46] Yang L, Wang J, Wang S S, et al. A new method to improve the sensitivity of nitrate concentration measurement in seawater based on dispersion turning point[J]. *Optik*, 2020, 205: 164202.
- [47] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [48] Komma J, Schwarz C, Hofmann G, et al. Thermo-optic coefficient of silicon at 1550 nm and cryogenic temperatures[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(4): 041905.
- [49] Schiebener P, Straub J, Levelt Sengers J M H, et al. Refractive index of water and steam as function of wavelength, temperature and density[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1990, 19(3): 677-717.
- [50] Quan X H, Fry E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18): 3477-3480.
- [51] Liao Y P. Seawater salinity measurement based on microfiber devices[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2019.
廖毅鹏. 基于微光纤器件的海水盐度测量方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2019.
- [52] Nagai R, Aoki T. Ultra-low-loss tapered optical fibers with minimal lengths[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28427-28436.
- [53] Grellier A J C, Zayer N K, Pannell C N. Heat transfer modelling in CO₂ laser processing of optical fibres[J]. *Optics Communications*, 1998, 152(4/5/6): 324-328.
- [54] Dimmick T E, Kakarantzas G, Birks T A, et al. Carbon dioxide laser fabrication of fused-fiber couplers and tapers[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(33): 6845-6848.
- [55] Brambilla G, Koizumi F, Feng X, et al. Compound-glass optical nanowires[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(7): 400-402.
- [56] Shi L, Chen X F, Liu H J, et al. Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5055-5060.
- [57] Tong L M, Lou J Y, Ye Z Z, et al. Self-modulated taper drawing of silica nanowires[J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(9): 1445-1448.
- [58] Tong L M, Hu L L, Zhang J J, et al. Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses[J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 82-87.
- [59] Xu Y X, Fang W, Tong L M. Real-time control of micro/nanofiber waist diameter with ultrahigh accuracy and precision[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10434-10440.
- [60] Fu J, Xu Y Y, Tang S F, et al. Transverse multimode evolution in non-adiabatic optical micro/nanofiber tapers[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(1): 014202.
- [61] Wang J, Wang X, Wang S S, et al. Method for preparing multi-mode interference exciting micro-nano optical fibers based on multi-step intermittent stretching: CN107601848B[P]. 2018-01-19.
王晶, 王鑫, 王姗姗, 等. 基于多步间歇式拉伸的激发多模干涉的微纳光纤制备方法: CN107601848B[P]. 2018-01-19.
- [62] Cheng X. Optical fiber tapering system: CN111856653A[P]. 2020-10-30.
谢诚. 一种光纤拉锥系统: CN111856653A[P]. 2020-10-30.
- [63] Jiang X S, Tong L M, Vienne G, et al. Demonstration of optical microfiber knot resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(22): 223501.
- [64] Sumetsky M. Optical fiber microcoil resonators[J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2303-2316.
- [65] Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M, et al. Optical microfiber loop resonator[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2005, May 22-27, 2005, Baltimore, Maryland United States. Washington, D. C.: OSA, 2005: CMY1.
- [66] Xu F, Horak P, Brambilla G. Optical microfiber coil resonator refractometric sensor[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7888-7893.
- [67] Sumetsky M, Windeler R S, Dulashko Y, et al. Optical liquid ring resonator sensor[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14376-14381.
- [68] Guo X, Tong L M. Supported microfiber loops for optical sensing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14429-14434.
- [69] Wang S S, Wang J, Li G X, et al. Modeling optical

- microfiber loops for seawater sensing[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(15): 3017-3023.
- [70] Yang H J, Wang S S, Wang X, et al. Temperature sensing in seawater based on microfiber knot resonator[J]. *Sensors*, 2014, 14(10): 18515-18525.
- [71] Yang H J, Liao Y P, Wang S S, et al. Analysis of microfiber knot resonator spectrum for seawater temperature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(8): 2368-2372.
- 杨红绢, 廖毅鹏, 王姗姗, 等. 微纳光纤环形腔海水温度的谐振光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(8): 2368-2372.
- [72] Yang H J, Wang J, Wang S S. Numerical calculation of temperature sensing in seawater based on microfiber resonator by intensity-variation scheme[J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2014, 9: 14047.
- [73] Yang H J, Wang J, Liao Y P, et al. Dual-point seawater temperature simultaneous sensing based on microfiber double knot resonators[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(8): 2398-2403.
- [74] Yang H J, Wang S S, Mao K N, et al. Numerical calculation of seawater temperature sensing based on polydimethylsiloxane-coated microfiber knot resonator[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2014, 4(4): 91-97.
- [75] Liao Y P, Wang J, Yang H J, et al. Salinity sensing based on microfiber knot resonator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 233: 22-25.
- [76] Liao Y P, Wang X, Yang H J, et al. Resonant mode characteristics of microfiber knot-type ring resonator and its salinity sensing experiment[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-8.
- [77] Li G X, Wang J, Yang H J, et al. Simulation study of microring resonator for seawater salinity sensing with weak temperature dependence[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2014, 68(2): 20502.
- [78] Liao Y P, Wang J, Wang S S, et al. Simultaneous measurement of seawater temperature and salinity based on microfiber MZ interferometer with a knot resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5378-5384.
- [79] Zhu H, Wang Y Q, Li B J. Tunable refractive index sensor with ultracompact structure twisted by poly(trimethylene terephthalate) nanowires[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(10): 3110-3114.
- [80] Liao C R, Wang D N, He X Y, et al. Twisted optical microfibers for refractive index sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 848-850.
- [81] Bo L, Wang P F, Semenova Y, et al. High sensitivity fiber refractometer based on an optical microfiber coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(3): 228-230.
- [82] 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): 10283-10289.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] Wang J, Liao Y P, Wang S S, et al. Ultrasensitive optical sensing in aqueous solution based on microfiber modal interferometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24843-24853.
- [87] Liu T Q, Wang J, Liao Y P, et al. Splicing point tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of temperature and salinity in seawater[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23905-23918.
- [88] 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.
- [89] Li Y, Wang J, Wang S S. Absolute salinity measurement based on microfiber coaxial Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 102(sp1): 194-201.
- [90] Wen J H, Wang J, Yang L, et al. Response time of microfiber temperature sensor in liquid environment [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6400-6407.