

一种聚合物涂覆光纤盐度传感器

刘倩, 马彦华, 徐琳, 刘仪琳, 李丽君*

(山东科技大学 电子通信与物理学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为了提高传感器灵敏度,减少成本,提出了一种基于聚酰亚胺涂层的全光纤 Mach-Zehnder(MZ)干涉式盐度传感器,传感部分由单模光纤-小芯径光纤-单模光纤(Single mode fiber-Thin core fiber-Single mode fiber, STS)错芯熔接而成,并将聚酰亚胺作为敏感膜涂覆在小芯径光纤之外,利用聚酰亚胺在电解质溶液中的溶胀特性而实现对盐度的传感。利用实验室配制的 NaCl 溶液进行传感器性能测试实验,结果表明,在其它条件不变的情况下,涂覆的敏感膜越厚,灵敏度越高。

关键词:全光纤 Mach-Zehnder; 小芯径; 聚酰亚胺; 灵敏度; 盐度检测

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)05-0021-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.006

Polymer coated optical fiber salinity sensor

LIU Qian, MA Yanhua, XU Lin, LIU Yilin, LI Lijun*

(School of Electronic Communication and Physics,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To improve sensor sensitivity and reduce costs, an all fiber Mach-Zehnder interferometric salinity sensor based on polyimide coating is presented, the sensing part is composed of single mode fiber-thin core fiber-single mode fiber structure by misaligned fusion spliced technology, polyimide is used as a sensitive membrane to be coated on the thin core fiber cladding, using the swelling properties of polyimide in electrolyte solution, to achieve the purpose of sensing of salinity. Using the NaCl solution prepared by the laboratory for the test of sensor performance, the experimental results show, under the condition of the same conditions, the thicker the thickness of the membrane, the higher the sensitivity.

Key words: all fiber Mach-Zehnder; thin core fiber; polyimide; sensitivity; salinity measurement

0 引言

盐度是海洋环境监测的一个重要参数,精确地监测水体盐度分布在海洋、生态等方面具有重要意义^[1]。目前,已经报道的光纤盐度传感器主要有光纤光栅类^[2-6]盐度传感器、基于空心光纤^[7,8]或空芯光子晶体光纤^[9]的盐度传感器等。其中,文献[4]提到了将聚酰亚胺涂覆在 FBG 结构上来实现盐度的测量,涂层厚度为 64 μm 时,传感器的灵敏度可达到 17.5 $\text{pm}/(\text{mol/L})$,但由

收稿日期:2018-01-24。

基金项目: 中国博士后特别项目(200902574)资助;中国博士后面上项目(20080441150)资助;山东省自然科学基金项目(ZR2013FM019, ZR2009AM017)资助;山东省自然教育厅项目(J06P14)资助;山东省矿山灾害预防控制重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金(MD-PC201602)资助。

作者简介: 刘倩(1993-),女,硕士,主要研究方向为光纤传感器。

* 通信作者:李丽君(E-mail: nankaillj@163.com)

于测量步骤繁琐,不利于实现传感器的简单化。文献[6]中提出了一种基于单端长周期光纤光栅的溶液浓度传感器,可以得到分辨率在低浓度和高浓度处分别可达到 3.50 g/L 和 1.96 g/L 以上,由于长周期光纤光栅对温度的敏感特性,还需要进一步研究改进。另外, Ahmed F 等人^[10]用光子晶体光纤作为传感器的传感臂,并用拉锥技术对传感光纤进行处理,虽然传感器的灵敏度最高可达到 1141.10 nm/RIU ,但由于拉锥技术的操作要求非常高,光子晶体光纤的价格也比较昂贵,不适合大批量生产,也无法满足生产实际需求^[10-15]。

基于以上研究背景,本文将聚酰亚胺在电解质溶液中的溶胀特性原理与全光纤 Mach-Zehnder(MZ)干涉仪的应力传感原理相结合,设计出一种新型的高精度干涉式盐度传感器。

1 MZ 干涉式盐度传感器的传感原理

本文研究的基于聚酰亚胺涂层的全光纤 MZ 干涉式盐度传感器的结构和光传输原理如图 1 所示。

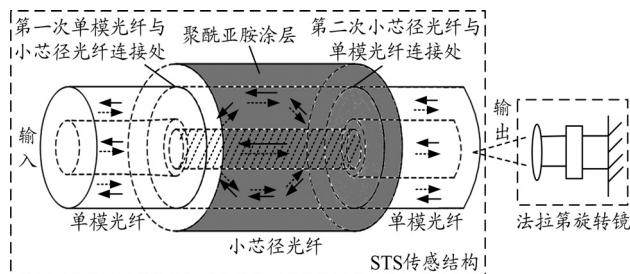


图 1 MZ 干涉式盐度传感器结构及工作过程

该传感器是将一小段小芯径光纤熔接在两段普通单模光纤之间, 形成纤芯失配的单模光纤-小芯径光纤-单模光纤 (Single mode fiber-Thin core fiber-Single mode fiber, STS) 的传感结构, 并在输出端熔接一个全光纤法拉第旋转镜; 入射光第一次在单模光纤与小芯径光纤连接处由于芯径不匹配, 在小芯径光纤的纤芯与包层中同时激发出传输模式, 一直到第二次小芯径光纤与单模光纤连接处, 再次由于芯径的不匹配, 小芯径光纤的纤芯与包层中的传输模式发生干涉, 最后在单模光纤的纤芯中传输。法拉第旋转镜等效成两个 MZ 干涉仪串联, 提高了灵敏度。

实验中将聚酰亚胺作为敏感膜涂敷在 STS 传感结构的小芯径光纤的包层之外, 由于聚酰亚胺在电解质溶液中的溶胀特性, 可以产生轴向应力, 引起小芯径光纤轴向伸缩, 使光纤长度发生变化, 从而引起 MZ 干涉谱发生漂移, 通过测量该漂移来实现对于外界盐度的传感。

由 MZ 干涉仪的基本工作原理, 可以得到传感器的输出光强为^[16]:

$$I = I_{co} + I_{cl} + 2\sqrt{I_{co}I_{cl}} \cos \Delta \varphi \quad (1)$$

其中, I_{co} 和 I_{cl} 分别为纤芯和包层中的传输光强, $\Delta \varphi$ 为相位差, 此时的相位差由图 1 可以看出包括来回两次传输, 具体可表达为:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi \Delta n L}{\lambda_0} \quad (2)$$

其中, L 为小芯径光纤的长度, λ_0 为真空中光的波长, Δn 为纤芯和包层折射率之差, 由此可知, 当 $\Delta \varphi = 2\pi N$ ($N=1, 2, 3$) 时, 波长对应在某干涉波峰值, 该波长为:

$$\lambda = \frac{2\Delta n L}{N} = \frac{2L}{N} [n_{eff}^{co}(\lambda_0) - n_{eff}^{cl}(\lambda_0)] \quad (3)$$

其中, $n_{eff}^{co}(\lambda_0)$ 为光纤纤芯有效折射率, $n_{eff}^{cl}(\lambda_0)$ 为包层模有效折射率。

由以上理论分析可知, 干涉波长的漂移与小芯径光纤的长度 L 有关, 当小芯径的长度 L 发生改变时, 干涉波长将发生漂移。

2 MZ 干涉式盐度传感器性能测试与结果分析

本文对该传感器进行性能测试, 其实验装置如图 2 所示。在实验过程中为防止 STS 结构破损影响实验, 将 STS 光纤结构固定在平滑玻璃板上, 并将玻璃板固定在实验平台桌面上, 利用 FITELE-S177 光纤熔接机对实验设备进行连接。连接好实验设备后, 打开宽带光源开关按钮, 并将前端旋钮设置于 on 处, 大小设置为 5.00mW。由宽带光源发出的光经过环形器后进入传感器, 再经法拉第旋转镜 (FRM) 反射回环形器, 从下一个端口输出到达光谱分析仪, 观测其干涉谱随盐度不同而产生的光谱变化情况。

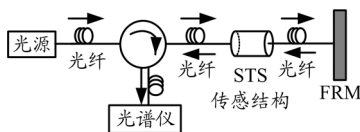
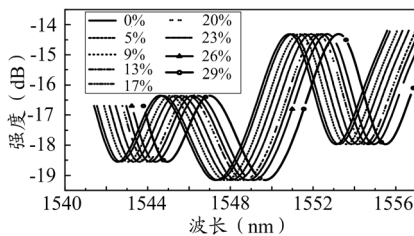


图 2 MZ 干涉式盐度传感器进行测试的实验装置

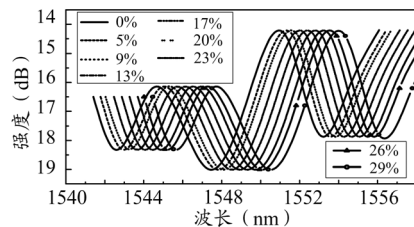
本实验配制质量百分比浓度分别为 0%、5%、9%、13%、17%、20%、23%、26% 和 29% 的 9 种 NaCl 水溶液作为盐度测试溶液, 并选取聚酰亚胺厚度分别为 35μm 和 55μm 的封装传感器结构进行对比实验, 分别标记为 1 号和 2 号传感器。

将 1 号传感器拉直固定在事先准备好的塑料水槽中, 用注射器依次注入浓度为 0%、5%、9%、...、29% 的盐溶液, 每组实验后用清水快速对水槽和 STS 结构进行清理, 待干涉谱不再漂移之后再进行下一组实验, 以防残留溶液干扰实验数据的准确性。2 号传感器也进行同样重复实验, 这时传感器随溶液浓度变化的响应光谱图分别如图 3 (a) 和图 3 (b) 所示。

由图 3 (a) 和图 3 (b) 可以看出, 随着 NaCl 溶液浓度的增大, 干涉谱波长均向长波长方向移动。选取



(a) 涂覆厚度 35μm

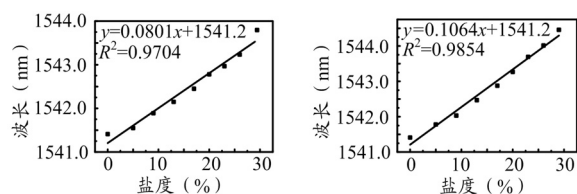


(b) 涂覆厚度 55μm

图 3 两种传感器盐度传感的光谱图

0%~29%的浓度变化范围,在此范围内随浓度的增加,涂覆厚度为 55 μm 的 2 号传感器,干涉谱第一个特征波长的波峰值由 1544.845nm 漂移到 1547.892nm,特征波长红移了 3.047nm,较之涂覆厚度为 35 μm 的 1 号传感器,特征波长向长波长方向的漂移量增加了 0.662nm。

两个传感器干涉波长与 NaCl 溶液浓度的实验数据线性拟合曲线分别如图 4(a)和图 4(b)所示。



(a) 1 号传感器涂覆厚度 35 μm (b) 2 号传感器涂覆厚度 55 μm

图 4 干涉波长与 NaCl 溶液浓度的线性拟合关系图

从图 4 可见,1 号和 2 号传感器均随着溶液盐度的增大,波长向长波漂移,这主要是随着盐度的增大,聚酰亚胺由于液体渗透增强而沿光纤轴向伸展,引起传感部分光纤轴向延展,因此带动整个传感结构的相位变大,体现到干涉谱上即为干涉波长向长波漂移。由图 4(a)可见,1 号传感器的波长/盐度传感灵敏度为 8.01pm/%,经线性拟合后,拟合度为 97.04%。而 2 号传感器对盐度的灵敏度可达到 10.64pm/%,较之 1 号传感器灵敏度提高了 2.63pm/%,线性拟合度为 98.54%,可见该类传感器具有具有较好的线性度。经过对比试验,可以得出初步结论:涂覆聚酰亚胺越厚,传感器灵敏度越高。为了进一步验证这一结论,我们选取 5 个不同涂覆厚度的封装传感器结构重复上述实验,结果如表 1 所示。

表 1 不同涂覆厚度传感器的灵敏度

涂覆厚度及 灵敏度	STS-1	STS-2	STS-3	STS-4	STS-5
涂覆厚度(μm)	35	40	45	50	55
灵敏度(pm/%)	8.01	8.93	9.45	10.19	10.64

由表 1 可以看出:随着涂覆厚度的增大,传感器的灵敏度越来越高。

3 结束语

本文对自行设计制作的 MZ 干涉式盐度传感器传感结构进行了实验研究,聚酰亚胺在不同浓度溶液中因溶胀性不同而产生轴向应力,并作用于小芯径光纤。实验对涂覆聚酰亚胺不同厚度的传感器对应的盐

度传感特性进行了对比,传感器体现出了很好的线性,而且涂覆聚酰亚胺越厚,传感器灵敏度越高。实验中发现,涂覆材料越厚,反应时间就越长,这需要根据应用场合对时间和数据采集要求来具体设计。此传感器对盐度具有较高的灵敏度,而且结构简单、廉价、易于实现和重复制作,这些都为同类传感器的实际应用带来方便,是一种具有发展前途的全光纤类盐度传感器。

参考文献:

- [1] BAO Wan-you, HOU Bao-rong, WANG Ji-ye, et al. A new proposal for density salinity scale (DSS98)[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000, 18(1): 92-96.
- [2] 赵明富,王念,罗彬彬.可同时测量蔗糖浓度和温度的组合光纤光栅传感器[J].中国光学,2014(3):476-482.
- [3] 刘贤超,赵春柳,陈业慈,等.一种基于 FBG 的测量海水温度和盐度的传感器, CN202453113U[P]. 2012.
- [4] 赵志文. 光纤光栅盐度传感器[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [5] 金清理,黄晓虹,颜利芬,等.长周期光纤光栅折射率传感器的结构优化[J].光子学报,2011,40(8):1201-1204.
- [6] 关寿华,于清旭,宋世德.基于单端长周期光纤光栅的浓度传感器[J].传感技术学报,2005,18(3):653-656.
- [7] 李恩邦,郑丹莹,张晨亮,等.基于空心光纤多模干涉的折射率传感器研究[J].光电子·激光,2010(10):1439-1444.
- [8] LI E B, ZHENG D Y, ZHANG C L, et al. A refractive index sensor based on the multimode interference in a hollow fiber [J]. Guangdianzi Jiguang/journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(10): 1439-1444.
- [9] WU D K C, LEE K J, PUREUR V, et al. Performance of Refractive Index Sensors Based On Directional Couplers in Photonic Crystal, Fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(22): 3500-3510.
- [10] LI L, MA Q, CAO M, et al. High stability Michelson refractometer based on an in-fiber interferometer followed with a Faraday rotator mirror [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2016, 234: 674-679.
- [11] ZHAO J, WANG Y, LIAO C, et al. Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber Michelson interferometer [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015, 208(4): 315-319.
- [12] LI Z, WANG Y, LIAO C, et al. Temperature-insensitive refractive index sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2014, 199(4): 31-35.
- [13] 傅海威,闫旭,邵敏,等.纤芯失配的光纤 Mach-Zehnder 折射率传感器[J].光学精密工程,2014,22(9):2285-2291.
- [14] AHMED F, AHSANI V, MELO L, et al. Miniaturized Tapered Photonic Crystal Fiber Mach-Zehnder Interferometer for Enhanced Refractive Index Sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(24): 8761-8766.
- [15] HAN C Y, DING H, LI X L, et al. Temperature insensitive refractive index sensor based on single-mode micro-fiber Sagnac loop interferometer [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(18): 181906-1-181906-4.
- [16] LI L, MA Q, CAO M, et al. High stability Michelson refractometer based on an in-fiber interferometer followed with a Faraday rotator mirror [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2016, 234(13): 674-679.