

嵌入式微纳光纤环形腔的海水盐度传感研究

李国祥 王姗姗 杨红娟 王晶

中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 通过将 Loop 型谐振腔嵌入在具有正热光系数的 MgF_2 中, 设计了海水中温度弱敏感的盐度传感器来实现海水盐度测量。利用 COMSOL 软件建立海水盐度传感模型, 结合 Matlab 对盐度传感器的特征参量进行数值研究。结果表明: 传感器的温度特性依赖于微纳光纤的半径, 温度弱敏感的光纤半径随探测波长的减小而减小; 盐度灵敏度随镀膜厚度和光纤半径的增大而减小; 探测极限随镀膜厚度的增加而增大, 随波长的减小而减小。通过优化, 传感器盐度灵敏度可达 $0.025 \text{ nm}/(\text{mg}/\text{mL})$, 探测极限可达到 $0.15 \text{ mg}/\text{mL}$ 。

关键词 光纤光学; 嵌入式环形腔; 海水盐度; 温度弱敏感性

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.050603

Study of Seawater Salinity Sensor Based on Embedded Microfiber Ring Resonator

Li Guoxiang Wang Shanshan Yang Hongjuan Wang Jing

School of Information Science and Technology, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract A new seawater salinity sensor is designed for salinity measurement by embedding the Loop resonator in MgF_2 which has a positive thermo-optic coefficient. The model of seawater salinity sensor is established by COMSOL software and combining with Matlab, and characteristic parameters of the sensor are studied. The results show that the temperature characteristic of embedded ring resonator sensor depends on the microfiber radius, and the size of microfiber for weak temperature dependence decreases with the decrease of wavelength. Higher sensitivity corresponds to smaller coating thickness and smaller microfiber radius. Detection limit increases with the increase of coating thickness and decreases with the decrease of wavelength. By optimizing the parameters of the sensor, sensitivity and detection limit can reach $0.025 \text{ nm}/(\text{mg}/\text{mL})$ and $0.15 \text{ mg}/\text{mL}$, respectively.

Key words fiber optics; embedded ring resonator; seawater salinity; weak temperature dependence

OCIS codes 060.2370; 060.4005; 140.4780; 010.4450

1 引言

近年来基于倏逝场耦合的亚波长微纳光纤传感器由于低成本、高灵敏度等优点受到了越来越多的关注, 被广泛应用在液体折射率测量、湿度测量等领域^[1-7]。亚波长光纤环形腔传感器根据维度可分为二维的 Knot, Loop 和三维的 Coil 型。其中 Loop 型微纳光纤传感器具有制备简单、灵敏度高优点, 但在应用中存在着稳定性差、易老化等问题。镀膜是解决此问题的一个很好的方法。2008 年, 一种夹层结构被提出用来消除这些问题, 该结构通过将环形腔嵌入在低折射率的 Teflon 中实现对环形腔的保护^[8]。

在海洋测量中, 海水盐度是重要的性能指标之一, 海水盐度的测量是至关重要的。考虑到在海水环境中, 温度的变化会影响到盐度的测量, 因此在海水盐度测量中需排除温度因素的影响。2011 年, Chen 等^[9]提出了空气中温度弱敏感的环形腔结构, 指出嵌入式微纳光纤环形腔的温度灵敏度大大依赖于微纳光纤的尺寸, 通过优化光纤半径, 可以实现系统对温度的弱敏感性。而在海水环境中, 海水对系统热效应的影响是必须考虑的, 至今未发现相关方面的研究。

收稿日期: 2013-10-02; 收到修改稿日期: 2013-11-12; 网络出版日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61171161)

作者简介: 李国祥(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳光纤方面的研究。E-mail: liguoxiang8806@163.com

导师简介: 王晶(1962—), 女, 博士, 教授, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: wjing@ouc.edu.cn(通信联系人)

本文提出了海水中温度弱敏感的嵌入式 Loop 型谐振腔传感器。首先研究了该传感器的温度灵敏度随光纤半径的变化关系,找出满足温度弱敏感条件下对应的光纤半径区,进而研究了系统的灵敏度与镀膜厚度、探测光波长、光纤半径的关系,最后模拟了包括各种损耗(波导损耗、弯曲损耗、吸收损耗)在内的 Q 参数和探测极限。该结果为微纳光纤环形腔应用于海洋探测提供了理论依据。

2 海水盐度传感器设计

2.1 结构模型设计

用于数值模拟的嵌入式环形腔结构模型如图 1 所示,该结构通过将微纳光纤环形腔嵌入在低折射率材料 MgF_2 中制备而成。低折射率材料 MgF_2 保证了微纳光纤的倏逝场能分布于海水当中。其横截面如图 1(b) 所示。图中的 d 指的是光纤至膜上下表面的距离,称为镀膜厚度。光纤周围是低折射率材料 MgF_2 ,最外面是探测物(海水)。该结构主要通过上下两个表面的倏逝场进行传感,而横向认为是无限延展的。

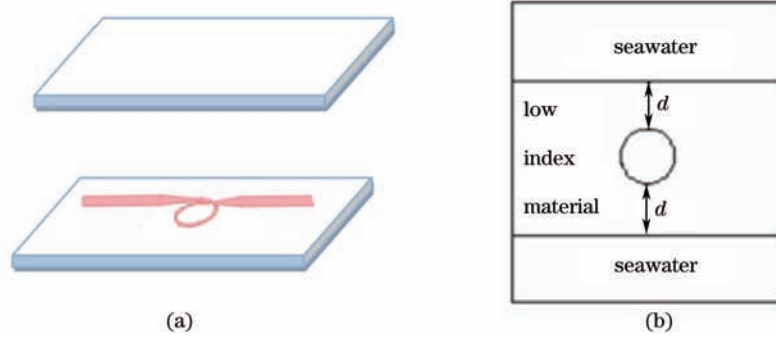


图 1 嵌入式微纳光纤 Loop 型环形腔。(a)结构示意图;(b)横截面示意图

Fig.1 Embedded microfiber loop resonator. (a) Structure schematic; (b) cross section

在海水盐度测量中,温度会影响到嵌入式环形腔传感器共振波长的移动。海水中嵌入式 Loop 型谐振腔的温度灵敏度为

$$S_T = S_{\text{TOE,MF}} + S_{\text{TOE,Mg}} + S_{\text{TOE,sea}} + S_{\text{TEE,MF}} + S_{\text{TEE,Mg}}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_{\text{TOE,MF}} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \sigma_{\text{MF}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{MF}}} \\ S_{\text{TOE,Mg}} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \sigma_{\text{Mg}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{Mg}}} \\ S_{\text{TOE,sea}} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \sigma_{\text{sea}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{sea}}} \\ S_{\text{TEE,MF}} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \alpha_{\text{MF}} \left(n_{\text{eff}} + r \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial r} \right) \\ S_{\text{TEE,Mg}} = \gamma \alpha_{\text{Mg}} \lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $S_{\text{TOE,MF}}$ 为微纳光纤的热光效应, $S_{\text{TOE,Mg}}$ 为嵌入式材料 MgF_2 的热光效应, $S_{\text{TOE,sea}}$ 为海水的热光效应; $S_{\text{TEE,MF}}$ 为微纳光纤的热延展效应, $S_{\text{TEE,Mg}}$ 为 MgF_2 的热延展效应; σ_{MF} 、 σ_{Mg} 、 σ_{sea} 分别指光纤材料、 MgF_2 和海水的感光系数, n_{eff} 为光纤基模有效折射率。

为了让系统对温度不敏感,令 $S_T = 0$ 即可得到系统的无热传感条件,此时共振波长不随温度变化而变化也即消除了温度因素的影响。光纤材料(氧化硅)的热光系数 $\sigma_{\text{MF}} = 1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,热延展系数 $\alpha_{\text{MF}} = 5.5 \times 10^{-7}[10]$ 。根据文献[11]给出的海水的折射率公式,海水的等效热光系数约为 $-1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。为了满足无热传感条件,需要一种正热光系数的材料来使得系统的温度灵敏度 S_T 为 0,这也是选择 MgF_2 这种材料的原因,它的折射率约为 1.37,热光系数为 $0.88 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

2.2 温度不敏感的微纳光纤半径计算

利用(1)式即可求得共振波长的温度灵敏度 S_T 。利用有限元软件 COMSOL 计算基模的有效折射率 n_{eff} 。因为镀膜厚度 d 和光纤半径 r 都会影响到温度灵敏度 S_T , 所以计算了温度灵敏度 S_T 与镀膜厚度 d 和光纤半径 r 的关系 $S_T(d, r)$, 如图 2(a) 所示。图中探测波长为 900 nm, 曲面表示 $S_T(d, r)$, 平面表示 $S_T=0$ 。这两个面的交线即是满足温度不敏感条件下的光纤半径和镀膜厚度。可以看出, 镀膜厚度 d 的不同会影响到温度不敏感对应的光纤半径 r , 即对于不同半径的微纳光纤, 可以选择合适的镀膜厚度使得传感器对温度不敏感。

选择图 2(a) 中的几个厚度 10, 50, 100, 150, 200 nm, 得出不同镀膜厚度 d 下的 S_T 随光纤半径的变化关系, 如图 2(b) 所示。从图中可以看出, 光纤半径的改变会显著影响到 S_T , 而镀膜厚度的变化对 S_T 影响相对较小。尤其是在光纤半径较大时, d 的变化几乎对温度灵敏度没有影响。

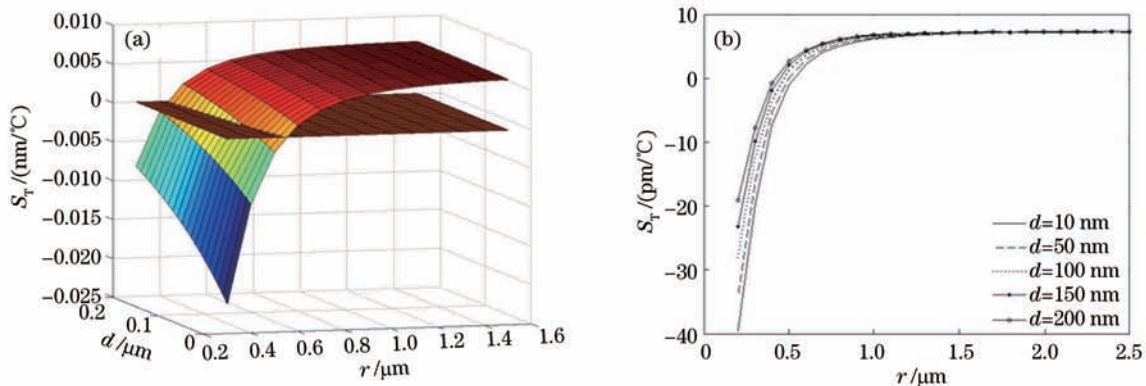


图2 温度灵敏度随光纤半径和镀膜厚度的变化关系(a)波长为 900 nm;(b)波长为 900 nm, 镀膜厚度 d 分别为 10,50,100,150, 200 nm

Fig.2 Dependence of temperature sensitivity on microfiber radius and coating thickness. (a) Wavelength is 900 nm; (b) wavelength is 900 nm and the coating thickness d is 10, 50, 100, 150, 200 nm, respectively

为了研究波长对温度灵敏度的影响, 计算出四种波长下的温度灵敏度随光纤半径的变化关系, 如图 3 所示。可以看到波长的改变影响了温度不敏感的光纤半径。假定 $|S_T| < 5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 时认为系统对温度不敏感(此时温度对谐振波长移动的影响对于光谱仪来说几乎测不出, 可以忽略温度对传感器的影响), 得到四种波长 1550, 1310, 1064, 900 nm 下的温度不敏感范围依次是 0.8~1.1 μm , 0.7~1 μm , 0.5~0.9 μm , 0.4~0.8 μm 。可以看出, 随着探测波长的减小, 温度不敏感的光纤半径逐渐减小。

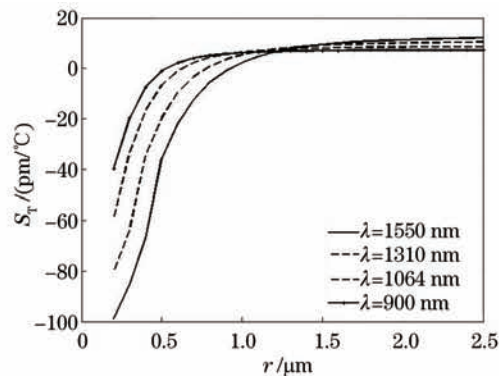


图3 四种波长下的温度灵敏度随光纤半径的变化关系, $d=10 \text{ nm}$

Fig.3 Dependence of temperature sensitivity on microfiber radius with four wavelengths, $d=10 \text{ nm}$

3 传感器灵敏度和探测极限

3.1 灵敏度

应用均匀传感方式^[12], 海水被认为是微纳光纤的最外层包层, 盐度的改变影响了海水的折射率, 从而改变了导模的有效折射率。应用谐振峰移方法把被测物的信息转变为传感器的光谱信号, 通过检测谐振波长的移动来实现这种转变。

盐度灵敏度 S_s 可定义为

$$S_s = \frac{\partial \lambda}{\partial S} = \frac{\partial \lambda}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial S} = S_n \frac{\partial n}{\partial S}, \quad (3)$$

式中 S_n 是折射率灵敏度, 其表达式为

$$S_n = \frac{\partial \lambda}{\partial n_{sea}} = \frac{\partial \lambda}{\partial n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{sea}} = \frac{\lambda}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{sea}}, \quad (4)$$

式中 n_{sea} 为海水的折射率。

根据(3)、(4)式可计算出盐度灵敏度随光纤半径的变化关系。图4(a)是探测波长为900 nm时五种厚度 d 下的盐度灵敏度随光纤半径的变化关系。从图中可看出盐度灵敏度 S_s 随着 d 的增加而减小, 随 r 的增大而减小。这是因为 d 的增大和 r 的增大都使得海水中的倏逝场能量减小。

为了研究探测波长对灵敏度 S_s 的影响, 计算了在温度不敏感的光纤半径范围内四种波长(1550, 1310, 1064, 900 nm)下的盐度灵敏度 S_s , 如图4(b)所示。从图4(b)可以看出, 对任一波长而言, 盐度灵敏度随光纤半径的变化趋势相同, 都随半径的增大而减小。如果要求传感器灵敏度达到某一值[如 0.02 nm/(mg/mL)], 所要求的温度不敏感的光纤半径随波长的减小而减小。通过优化, 盐度灵敏度可以达到 0.025 nm/(mg/mL), 这个结果要高于光纤布拉格光栅传感器^[13], 其盐度灵敏度为 0.0165 nm/(mg/mL)。

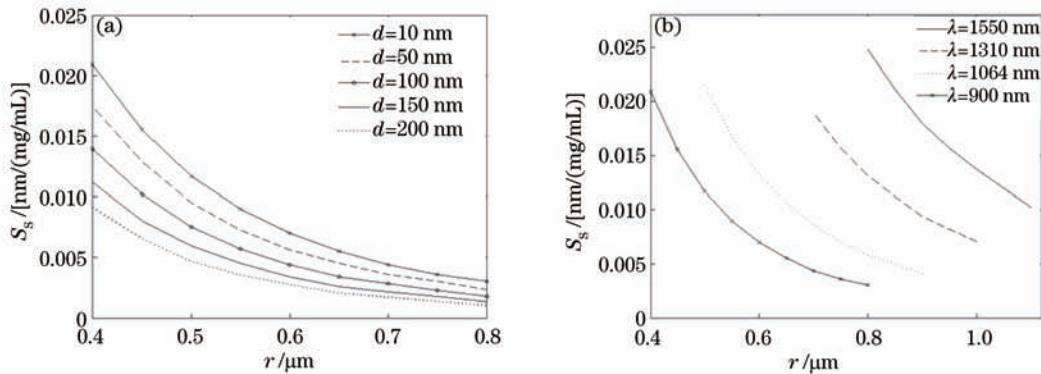


图4 盐度灵敏度与光纤半径的关系。(a)波长为900 nm, 镀膜厚度 d 分别为10, 50, 100, 150, 200 nm; (b) $d=10$ nm, 波长分别为1550, 1310, 1064, 900 nm

Fig.4 Dependence of salinity sensitivity on microfiber radius. (a) Wavelength is 900 nm, and coating thickness is 10, 50, 100, 150, 200 nm, respectively; (b) coating thickness is 10 nm, and the wavelength is 1550, 1310, 1064, 900 nm, respectively

3.2 探测极限

除灵敏度外, 探测极限是表征传感器好坏的另一重要参数。它定义为由被探测物引起的最小的可探测信号变化:

$$P_s = \frac{\lambda}{S_s Q}. \quad (5)$$

利用(5)式可以求得探测极限。式中的 Q 参数与损耗密切相关, 本文考虑的损耗有波导损耗、吸收损耗和弯曲损耗。在计算过程中, 选择的波长为 1550, 1390, 1310, 1064, 900 nm。选取的光纤半径分别是各波长下的温度不灵敏半径, 分别为 0.9, 0.85, 0.8, 0.6, 0.5 μm 。假定波导损耗为 0.054 dB/mm。各波长下的海水吸收系数 α_{sea} 分别为 1.16, 1.1, 0.1505, 0.0144, 0.0065 mm^{-1} [14]。

首先计算了 Q 参数, 因为 Q 参数是影响探测极限的重要因素。图5(a)是在波长为900 nm时, 不同厚度 d 下的 Q 参数与环直径 D 的关系。可以看出, Q 随 d 的增大而增大。这是因为 d 的增大使得存在于海水中的能量减小。

在波长为900 nm时, 计算得到不同镀膜厚度 d 下盐度探测极限 P_s 随环直径的变化关系, 其结果如图6(a)所示。从图中可以看出, 随着 d 的增大探测极限呈依次增大的状态。根据(5)式可知探测极限与 Q 成反比, 这看起来与图5(a)表示的结果不符。从探测极限定义(5)式可以看出, 除 Q 外 S_s 也是影响 P_s 的关键因素, 而研究发现随着 d 的增大 S_s 呈减小状态。 S_s 在 P_s 的变化中扮演了更重要的角色, 使得 P_s 随 d 的增大而增大。

探测波长是影响探测极限的重要因素。计算出五种波长下的盐度探测极限 P_s 随光纤环直径的变化关

系,如图6(b)所示。从图中可知在相同的环直径下,探测极限随波长的减小呈现减小的趋势,这主要因为长波长下的总损耗是要高于短波长的。可以看到对于环直径较小的情况,1550 nm下的探测极限 P_s 迅速下降。其原因是在环半径较小时,弯曲损耗在总损耗中占主要地位,而1550 nm波长下的弯曲损耗要大于其他波长下的损耗,同时弯曲损耗随光纤环半径的增大在一定区域内迅速减小然后趋于平缓^[15]。

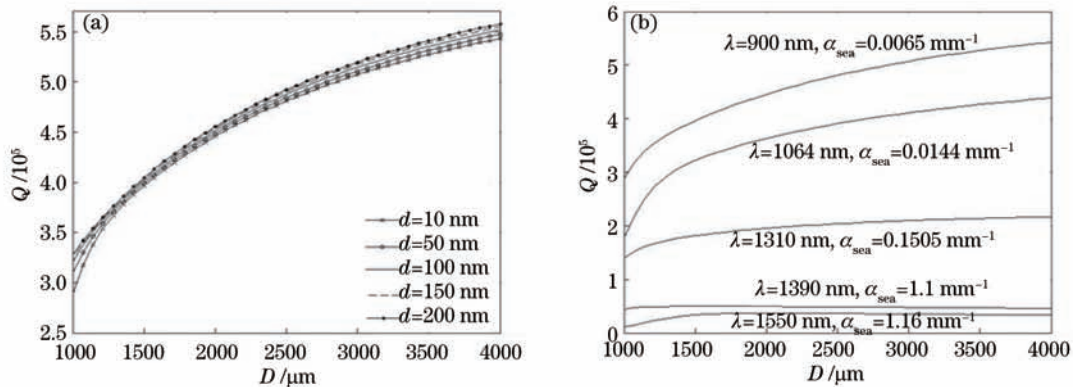


图5 Q 参数随环直径的变化。(a) 波长为 900 nm, $d = 10, 50, 100, 150, 200$ nm; (b) $d = 10$ nm, 波长分别为 1550, 1390, 1310, 1064, 900 nm

Fig.5 Dependence of Q factor on ring diameter. (a) Wavelength is 900 nm, and coating thickness d is 10, 50, 100, 150, 200 nm, respectively; (b) coating thickness is 10 nm, and wavelength is 1550, 1390, 1310, 1064, 900 nm, respectively

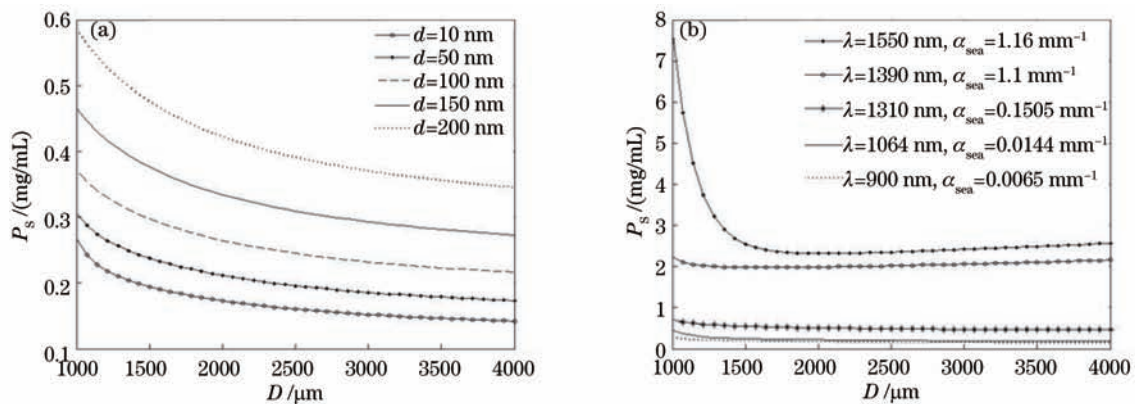


图6 探测极限 P_s 随环直径的变化。(a) 波长 900 nm, $d = 10, 50, 100, 150, 200$ nm; (b) $d = 10$ nm, 波长分别为 1550, 1390, 1310, 1064, 900 nm

Fig.6 Dependence of detection limit P_s on ring diameter. (a) Wavelength is 900 nm, and coating thickness is 10, 50, 100, 150, 200 nm, respectively; (b) coating thickness is 10 nm, and wavelength is 1550, 1390, 1310, 1064, 900 nm, respectively

从图6(b)还可以看出,在波长 1550 nm 和 1390 nm 下,探测极限随环直径增大先减小后缓慢增大,其他几个波长则呈一直减小的趋势,这可能与 Q 参数有关,故画出不同波长下 Q 参数的变化情况,如图5(b)所示。可以看到这两个波长下的 Q 随环直径的增大先增大后缓慢减小,其他几个波长下的 Q 参数一直呈增大状态,这也就解释了图6(b)中 1550 nm 和 1390 nm 下 P_s 先减小后增大的现象。从图5(b)还可以看出,一般情况下大的吸收系数对应着较小的 Q ,这是因为吸收系数越大,吸收损耗越大,使得 Q 变小。

3.3 海水盐度传感器的优化设计

盐度灵敏度和探测极限与传感器各参数紧密相关,通过优化这些参数可以提高传感器灵敏度和降低探测极限。经过优化,当波长为 900 nm、光纤半径为 500 nm、镀膜厚度为 10 nm、环直径为 3500 μm 时,该传感器盐度灵敏度可达 0.025 nm/(mg/mL),探测极限可达到 0.15 mg/mL。

4 结 论

通过将微纳光纤 Loop 型环形腔嵌入在具有正热光系数的低折射率材料 MgF_2 中实现海水盐度测量。首先,利用 COMSOL 软件建立了温度弱敏感的嵌入式 Loop 型谐振腔模型,结合 Matlab 计算了传感器的温度

灵敏度。得出了不同波长下的温度弱敏感的光纤半径范围,该范围受镀膜厚度 d 影响较小。然后,计算了在温度弱敏感半径区内的盐度灵敏度,该灵敏度随膜厚和光纤半径的增大而减小。最后,模拟了包含各种损耗在内的探测极限。探测极限随波长的减小而减小,随镀膜厚度的增加而增大。通过优化传感器参数,该传感器盐度灵敏度可达 $0.025 \text{ nm}/(\text{mg}/\text{mL})$,盐度探测极限可达到 $0.15 \text{ mg}/\text{mL}$ 。

参考文献

- 1 N M Hanumegowda, C J Stica, B C Patel, *et al.*. Refractometric sensors based on microsphere resonators [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(20): 201107.
- 2 M Sumetsky, Y Dulashko, J M Fini, *et al.*. The microfiber Loop resonator: theory, experiment, and application [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 242-250.
- 3 F Xu, P Horak, G Brambilla. Optical microfiber coil resonator refractometric sensor [J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7888-7893.
- 4 Y Z Sun, X D Fan. Analysis of ring resonators for chemical vapor sensor development [J]. *Opt Express*, 2008, 16(14): 10254-10268.
- 5 F Xu, G Brambilla. Demonstration of a refractometric sensor based on optical microfiber coil resonator [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(10): 101126.
- 6 Yang Feiya, Wu Yu, Rao Yunjiang, *et al.*. Theory and experiment research of double-knot resonators based on micro-fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(1): 010603.
杨飞亚, 吴宇, 饶云江, 等. 基于微纳光纤的双环谐振腔理论与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(1): 010603.
- 7 P Wang, F X Gu, L Zhang, *et al.*. Polymer microfiber rings for high-sensitivity optical humidity sensing [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(31): G7-G10.
- 8 F Xu, V Pruneri, V Finazzi, *et al.*. An embedded optical nanowire loop resonator refractometric sensor [J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1062-1067.
- 9 Y Chen, F Xu, Y Q Lu. Teflon-coated microfiber resonator with weak temperature dependence [J]. *Opt Express*, 2011, 19(23): 22923-22928.
- 10 M J Weber. *Handbook of Optical Materials* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- 11 X H Quan, E S Fry. Empirical equation for the index of refraction of seawater [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(18): 3477-3480.
- 12 C Y Chao, L J Guo. Design and optimization of microring resonators in Biochemical sensing applications [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(3): 1395-1402.
- 13 L Q Men, P Lu, Q Y Chen. A multiplexed fiber Bragg grating sensor for simultaneous salinity and temperature measurement [J]. *J Appl Phys*, 2008, 103(5): 053107.
- 14 L H Kou, D Labrie, P Chylek. Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5- μm spectral range [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(19): 3531-3540.
- 15 S S Wang, J Wang, G X Li, *et al.*. Modeling optical microfiber loops for seawater sensing [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(15): 3017-3023.