

文章编号: 1001-3806(2010)03-0313-03

## 一种基于菲涅耳原理的光纤盐度测量方法

马晓春<sup>1,2</sup>, 董俊良<sup>2</sup>, 梁芳<sup>1</sup>, 马宁<sup>3</sup>

(1. 新疆计量测试研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 3. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

**摘要:** 为了测量不同盐度条件下的海水折射率的变化, 进而得到海水的盐度, 提出了一种应用菲涅耳定理设计的光纤盐度测量方法。介绍了测量原理和初步的实验结果。该方法简单、快速、准确度及灵敏度高。结果表明, 此方法在测量盐度时分辨率好于 0.4%, 可应用于海水盐度的实时监测等场合; 理论上可以测量任何气体、液体和固体的浓度(折射率), 适用于工业在线监测物质的浓度(折射率)。

**关键词:** 测量与计量; 盐度测量; 菲涅耳原理; 折射率

**中图分类号:** TP212; TN253

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.008

### A fiber optic salinity measurement method based on the Fresnel principle

MA Xiao-chun<sup>1,2</sup>, DONG Jun-liang<sup>2</sup>, LIANG Fang<sup>1</sup>, MA Ning<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Research Institute of Measurement & Testing, Urumqi 830011, China; 2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to measure the refractive index of the salt solution so that its salinity can be obtained, a measurement method with optical fiber based on the Fresnel principle was put forward. Its principle was introduced and the experimental results were obtained. The experiments indicated that the resolution was smaller than 0.4%. This method is simple, fast, sensitive and accurate. It can be applied in real-time monitoring of the seawater salinity. It also can be widely used in the field of industrial on-line concentration or refractive detection.

**Key words:** measurement and metrology; salinity measurement; Fresnel principle; refractive index

### 引言

盐度是海洋动力学以及海洋与大气相互作用中起关键作用的重要参量。盐度的变化与海洋环境及气候的变化有很强的内在联系。因此, 对其快速精确的检测, 对研究海洋学、海洋环境和气候的监测及预测、军事、沿海采油以及海洋渔业等具有十分重要的实用意义和社会、经济效益。

国内外研究人员已经提出了很多盐度检测的方法, 随着光纤传感技术的不断发展, 越来越多的研究人员开始应用光纤传感的独有特性进行盐度<sup>[1]</sup>的检测, 包括裸露光纤盐度检测法<sup>[2]</sup>、表面等离子共振盐度检测法<sup>[3,4]</sup>、基于位置敏感型传感器的盐度检测法<sup>[5,6]</sup>、布里渊散射法<sup>[7]</sup>等, 但这些方法大都存在灵敏度不高、响应时间长等问题, 因此并没有得到广泛的应用。

作者提出了一种应用菲涅耳定理设计的海水盐度

的光纤测量方法。通过测量不同盐度条件下的海水折射率的变化, 进而得到海水的盐度。这种方法具有简单、快速、准确度和灵敏度高的特点。在测量中, 仅需要较少的实验数据, 即可完成海水盐度的测量, 且不需要调整装置。作者提出的海水盐度的光纤测量方法不涉及腐蚀工艺、端面处理简单, 一次标定后可用来重复性测量, 测量范围宽, 并且从理论上可对任何从气体到液体和固体的浓度(折射率)进行测量。

### 1 测量原理与测量装置<sup>[8-9]</sup>

当一束光照射到两种不同介质的分界面时, 一部分光会被反射, 反射率( $r_p$  与  $r_s$ )由菲涅耳公式确定:

$$r_p = \frac{E_p'}{E_p} = \frac{\tilde{n}_2\mu_1 \cos i_1 - \tilde{n}_1\mu_2 \cos i_2}{\tilde{n}_2\mu_1 \cos i_1 + \tilde{n}_1\mu_2 \cos i_2} \quad (1)$$

$$r_s = \frac{E_s'}{E_s} = \frac{\tilde{n}_1\mu_2 \cos i_1 - \tilde{n}_2\mu_1 \cos i_2}{\tilde{n}_1\mu_2 \cos i_1 + \tilde{n}_2\mu_1 \cos i_2} \quad (2)$$

式中,  $E_p$  与  $E_s$  分别表示垂直于入射面振动的分量( $s$ 分量)的振幅与平行于入射面振动的分量( $p$ 分量)的振幅;  $E_p'$  与  $E_s'$  分别表示反射波在这两个方向上的振幅;  $\mu_1$  与  $\mu_2$  表示两种介质的磁导率;  $i_1$  和  $i_2$  分别表示反射

作者简介: 马晓春(1980-), 男, 工程师, 现主要从事光纤传感技术与光电检测的研究。

E-mail: mxc708@163.com

收稿日期: 2009-05-14; 收到修改稿日期: 2009-05-31

角和折射角。两种介质的折射率的复数表示形式为:

$$\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1 \quad (3)$$

$$\tilde{n}_2 = n_2 - ik_2 \quad (4)$$

$n_1$  与  $n_2$  分别表示两种介质的折射率;  $k_1$  与  $k_2$  分别表示两种介质的衰减系数,且满足:

$$k = \alpha\lambda / (4\pi) \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  表示介质的吸收系数;  $\lambda$  表示入射光的波长。

采用 3dB“X”型单模光纤耦合器将入射光导入光纤纤芯与待测液体界面,并收集反射光,光纤的端面被平整地切开以满足正常的入射条件(如图 1 所示)。

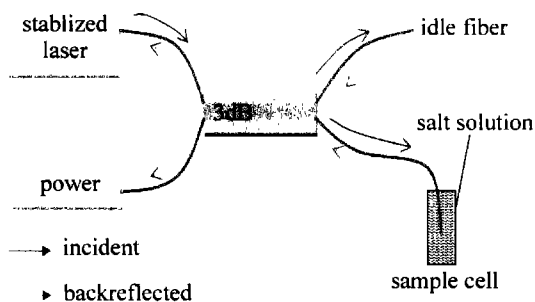


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system

在此种情况下,磁导率为 1。实验中,介质 1 为光纤纤芯,折射率  $\tilde{n}_1 = n_{\text{fiber}} = 1.460$ ; 介质 2 为盐溶液,折射率为  $\tilde{n}_2 = n_{\text{salt}} - ik_{\text{salt}}$ , 因此,本实验中的全部反射光的光强  $R$  可表示为:

$$R = |r_p|^2 = |r_s|^2 = \left| \frac{\tilde{n}_1 - \tilde{n}_2}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} \right|^2 = \frac{(n_{\text{fiber}} - n_{\text{salt}})^2 + k_{\text{salt}}^2}{(n_{\text{fiber}} + n_{\text{salt}})^2 + k_{\text{salt}}^2} \quad (6)$$

由上式可知,盐溶液的折射率  $n_{\text{salt}}$  可由  $R$  和  $k_{\text{salt}}$  确定;  $R$  通过实验可直接测得:

$$k_{\text{salt}} = \frac{\alpha_{\text{salt}}\lambda}{4\pi} \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{salt}} = \alpha_0 c \quad (8)$$

在本实验中,介质吸收系数  $\alpha_0 = 0.9\text{cm}^{-1}$ ,  $c$  为光速。

在自然界中,实验系统中必然会存在本征反射。本征反射光有几种来源,从闲置光纤的端面反射回来的,从两个光纤的融接点反射回来的,或者是其它诸如光纤缺陷等因素引起的。所以,实际的反射光功率是不能够直接确定出来的,必须加以校正。校正的方法是对已知折射率的两种不同介质的反射光功率进行测量。实验中光源的中心波长为 1550nm,室温为 20℃,在一标准大气压下,空气和水的折射率分别为  $n_{\text{air}} = 1.00027$  和  $n_{\text{water}} = 1.32191$ , 于是实验系统中的固有反射功率  $P_0$  可以由下面的关系式给出:

$$\frac{(P_{\text{water}} - P_0)S}{(P_{\text{air}} - P_0)S} = \frac{P_{\text{water}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} = \frac{\left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{water}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{water}}} \right)^2}{\left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2} \quad (9)$$

式中,  $S$  表示光纤端面的有效面积;  $P_{\text{air}}$  和  $P_{\text{water}}$  分别表示检测光纤浸入水和空气两种测试样本中的反射光功率。由上式,可以得出固有反射功率  $P_0$ 。

依照上述测量原理,同样可以得出盐溶液的折射率:

$$n_{\text{salt}} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{P_{\text{salt}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} \right) \left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2 \right] n_{\text{fiber}}}{\left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{salt}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} \right) \left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2 \right]} \pm \sqrt{\left\{ \frac{\left[ 1 + \left( \frac{P_{\text{salt}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} \right) \left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2 \right] n_{\text{fiber}}}{\left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{salt}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} \right) \left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2 \right]} \right\}^2 - n_{\text{fiber}}^2 - k_{\text{salt}}^2}} \quad (10)$$

式中,  $P_{\text{salt}}$  表示当检测光纤浸入盐溶液时测得的反射功率。从上式中可以看出,对于同一个测得的反射光功率值,会有两个折射率值与之对应。因为

$$\frac{\left[ 1 + \left( \frac{P_{\text{salt}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} \right) \left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2 \right]}{\left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{salt}} - P_0}{P_{\text{air}} - P_0} \right) \left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2 \right]} > 1, \quad (10) \text{ 式的第 1 项恒}$$

大于  $n_{\text{fiber}}$ , 第 2 项恒正,而在本实验中选取的盐溶液的折射率比光纤折射率  $n_{\text{fiber}}$  小,因此,实际计算中,上式应该选取“-”号。

## 2 实验结果

本实验中采用的光源为放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源,功率为 20mW,并用光功率计接收波长为 1550nm 的光功率值。当待测液体盐度的变化范围为 0% ~ 17% 时,实验数据如图 2a

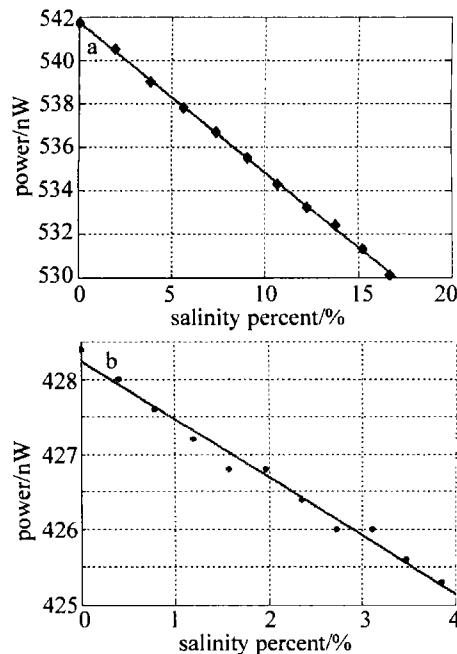


Fig. 2 Data curve from the experiment

所示,从曲线中可以看出,此方法具有很好的线性度。由于海水盐度的最大值为4%,在实验中,每次改变盐溶液的盐度0.4%,得到的实验曲线如图2b所示,同样具有较好的线性度,从而证明了此种方法具备简单、快速、准确度及灵敏度高的特点。

从实验曲线可以看到,随着盐度的增大,光功率计接收到的功率值逐渐减小。在此实验中,入射光的导入与反射光的收集是同一根光纤在同一位置来完成,这样就避免了光纤的移动和调整装置;同时,由菲涅耳公式可知,光纤端面的角度并不影响反射功率的大小,这样就大大提高了整个实验系统的准确度和灵敏度。

此测量方法的灵敏度为:

$$dn = \frac{\left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2}{P_{\text{air}} - P_0} \cdot \frac{[(n_{\text{fiber}} + n_{\text{salt}})^2 + k_{\text{salt}}^2]^2}{4n_{\text{fiber}}(n_{\text{fiber}}^2 - n_{\text{salt}}^2 - k_{\text{salt}}^2)} \cdot dP \quad (11)$$

式中, $dP$ 表示功率计可以分辨的最小的功率变化值。在此实验条件下,功率计可以分辨的功率值为 $dP = 0.01 \text{ dBm}$ 。

在本实验中,由于采用的光源为ASE光源,接收端接收1550nm波段的光功率值,入射光的光功率值较小。因此,适当地增加入射光的光功率值(如采用1550nm的半导体激光器),可以提高测量的准确度和灵敏度。同时,值得注意的是,每次进行测量之前,都需要对当下测量环境中的空气和水的测量值进行标定,以求得到最为准确的测量结果。

### 3 结论

作者应用菲涅耳原理设计了一种简单、快速、准确

的海水盐度测量方法。测量的分辨率好于0.4%,适当地调整实验装置的参量可以进一步提高测量的精确度。本方法不仅可以应用到海水的盐度测量方面,理论上可以应用到任何气体、液体和固体的浓度(折射率)的测量,是一种较为便捷的测量方法。此方法可以进一步应用到折射率的实时监测,适用于工业的在线检测折射率。

### 参 考 文 献

- [1] ZHAO Y, HU K B, CHEN S Zh, *et al.* Recent development of the sea-water salinity measurement technology[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2008, 35(11):38-44 (in Chinese).
- [2] HAN Y W, LI X G, CHEN R. An optical fiber sensor for salinity measurement[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2005, 14(4):308-310 (in Chinese).
- [3] KO W S, OH S B, KIM S H, *et al.* Development of fiber type surface plasmon resonance sensor for protein detection[J]. *SPIE*, 2004, 5272:100-109.
- [4] WU Y C, YUAN Y F. Research of a novel principle on sea-water salinity measurement based on refractive index change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2):199-202 (in Chinese).
- [5] ZHAO Y, LIAO Y B, ZHANG B, *et al.* Monitoring technology of salinity in water with optical fiber sensor[J]. *Lightwave Technology*, 2003, 21(5):1334-1338.
- [6] ZHAO Y, ZHANG B, LIAO Y B, *et al.* Experimental investigation of salinity measurement based on optical-electrical dual-differential methods [J]. *SPIE*, 2002, 4920:496-500.
- [7] GAO Y, YANG K Ch, XIA M. Discussion about angular distribution of Brillouin scattering intensity[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):420-423 (in Chinese).
- [8] LIU Ch Y, YU Y L, GAO Y J. Fiber Refractometer Based on the Fresnel's Principle[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(12):1464-1466 (in Chinese).
- [9] LIU T L, CHEN X F, DI Z, *et al.* Measurement of the magnetic field-dependent refractive index of magnetic fluids in bulk[J]. *Chinese Optics Letter*, 2008, 6(3):195-196.
- [10] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [11] ZHANG B, WANG Zh. Antireflection coating for two dimensional air hole type photonic crystal negative refraction slab lens [J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, 56(3):1404-1408 (in Chinese).
- [12] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, *et al.* Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1):48-51 (in Chinese).
- [13] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):84-87 (in Chinese).
- [14] HUANG C H, LAI Y H, CHENG S C, *et al.* Modulation instability in nonlinear coupled resonator optical waveguides and photonic crystal waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3):1299-1307.
- [15] HAMAM R E, IBANESCU M, JOHNSON S G, *et al.* Broadband super-collimation in a hybrid photonic crystal structure [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10):8109-8118.
- [16] TANG B Sh, YIN G W, XU J L, *et al.* Study on the transmission spectra of two dimension photonic crystals with layered composite medium cylinder[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2):127-130 (in Chinese).
- [17] SHEN X P, HAN K, SHEN Y F, *et al.* Self-collimation of unpolarized electromagnetic waves in 2-D photonic crystals [J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, 55(6):2760-2765 (in Chinese).
- [18] RONG Ch C, YAN K Zh, XIE Y M. The distribution of the electric field in two dimension photonic crystals [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):75-79 (in Chinese).
- [19] SULLIVAN D M. Electromagnetic simulation using the FDTD method [M]. New York: Electrical Engineering Department University of Idaho, 2000:1-176.

(上接第296页)