

# 基于光纤开放式法布里-珀罗干涉仪的液体折射率测量

宋鹏, 荆振国\*, 李昂, 郭铖, 彭伟

大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024

**摘要** 法布里-珀罗(F-P)干涉仪结构的光纤传感器因其结构简单、体积小、高灵敏度等优点得到了广泛的应用,开放式法布里-珀罗干涉仪传感器可对待测液体的折射率进行测量。利用机械切割、飞秒激光击穿等方法可以制成开放式法布里-珀罗干涉仪。利用玻璃焊剂将开放的空心毛细管和两段单模光纤焊接在一起,制成开放式法布里-珀罗干涉仪传感器,并采用交叉相关的信号处理技术实现对待测液体折射率的绝对测量。采用不同浓度的氯化钠溶液进行折射率测量实验,折射率测量分辨率可达到  $10^{-5}$  RIU 量级,传感器的温度灵敏度为  $39.59 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

**关键词** 测量; 法布里-珀罗干涉仪; 折射率; 传感器

**中图分类号** TP212

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1204007

## Refractive Index Measurement of Liquid Based on Open Fiber Fabry-Perot Interferometer

Song Peng, Jing Zhenguo, Li Ang, Guo Cheng, Peng Wei

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** Fiber optic sensors based on the Fabry-Perot (F-P) interferometer have been widely used because of its simple structure, small size, and high sensitivity. The refractive index of liquid can be measured by the open F-P interferometer. We can make an open F-P interferometer through mechanical cutting, femtosecond laser breakdown and some other methods. An open F-P interferometer sensor is fabricated with an open hollow capillary and two segments of single-mode fibers welded together by glass flux. Absolute measurement of refractive index of liquid can be achieved when the cross-correlation signal processing technology is used. Refractive index measurement experiments are performed for NaCl solutions with different concentrations. The measurement resolution for refractive index can reach  $10^{-5}$  RIU magnitude, and the temperature sensitivity of the sensor is  $39.59 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

**Key words** measurement; Fabry-Perot interferometer; refractive index; sensor

**OCIS codes** 120.5060; 050.2230; 060.2370; 260.3160

## 1 引言

光纤传感器因其结构紧凑、轻便,抗电磁干扰,以及耐腐蚀性强等优点得到了长足发展<sup>[1-2]</sup>。相位调制型光纤传感器由于采用干涉技术而具有很高的检测灵敏度,光纤传感器中光的干涉主要通过各种光纤干涉仪来实现<sup>[3-5]</sup>。法布里-珀罗(F-P)干涉仪结构的光纤传感器结构简单、体积小、可靠性高、灵敏度高、响应快且为单光纤信号传输,因而得到了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。目前可以在两段单模光纤之间熔接一段多模光纤,利用折射率差异制成光纤 F-P 传感器<sup>[8]</sup>;也可以将光纤与准直毛细管熔接在一起,制成 F-P 传感器<sup>[9]</sup>。Jung 等<sup>[10]</sup>利用 U 型钻石刀片切割光纤制成一个短的开放式空气 F-P 腔。Liu 等<sup>[11]</sup>提出采用飞秒激光诱发水击穿的方

收稿日期: 2017-07-12; 收到修改稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61727816, 61520106013, 11474043)、中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16TD17)

作者简介: 宋鹏(1993—),男,硕士研究生,主要从事 F-P 传感器方面的研究。E-mail: nirvana.sp@hotmail.com

导师简介: 彭伟(1969—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤表面等离子激元共振传感技术等方面的研究。

E-mail: wpeng@dlut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jingzg@dlut.edu.cn

法在光纤上刻出开放式空气 F-P 腔。

本文利用金刚锉将一段空心毛细管刻出一个缺口,再将两段单模光纤从两个端口插入,在毛细管中的两个光纤端面可以形成 F-P 干涉仪。焊接过程采用玻璃焊剂,可实现传感器整体无胶化。传感器的 F-P 干涉仪是开放式的,可以直接与外界物质接触,进而完成待测物质的折射率测量。这种传感器结构简单,易制作。利用交叉相关的信号处理方法<sup>[12]</sup>,可实现对待测液体折射率的绝对测量。本文测量了不同浓度盐溶液的折射率,并进行了温度灵敏度实验。测量结果显示,传感器的分辨率可达到  $10^{-5}$  RIU 量级,折射率灵敏度约为  $10^5$  nm/RIU,温度灵敏度为  $39.59$  nm/°C。商业化的折射率测量仪器阿贝折射仪的分辨率只有  $10^{-4}$  RIU,并存在温度变化和校正仪器导致的测量误差。相比而言,本文制得的传感器分辨率更高,不需要校正就可以实现绝对测量,体积小且易制作,具有良好的商业化应用前景。

## 2 光纤开放式 F-P 干涉仪折射率测量基本原理

折射率传感器采用 F-P 干涉仪结构,需要考虑干涉条纹对比度对实验结果和稳定性的影响。在导入光纤为单模光纤的 F-P 传感器中,传输光束在空间中的发散和光纤的孔径效应会导致传感器的干涉条纹对比度随腔长的增加而下降<sup>[13]</sup>。

在 F-P 折射率传感器中发生的干涉是两个反射光之间的双光束干涉,干涉后的光强是 F-P 腔内的光返回并再次耦合进光纤的光强,为

$$I_R = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta = I_0 R [1 + (1 - R)^2 \beta^2 (2d) + 2\beta(2d)(1 - R) \cos \delta], \quad (1)$$

式中  $\delta = 4\pi n d / \lambda + \pi$  为两次反射光之间的相位差,  $I_1$  为第一次反射光光强,  $I_2$  为第二次反射光光强,  $I_0$  为入射光纤端面注入腔内的初始光强,  $R$  为光纤端面的反射率,  $\beta(2d)$  为耦合系数,  $d$  为 F-P 腔的腔长。光强的损耗体现在耦合系数  $\beta$  上。

单模光纤只传输光场的基模。基模高斯光束由导入光纤耦合到 F-P 光纤传感器的空气腔内,经过两次菲涅耳反射,再次耦合进入导入光纤。在单模光纤中,光线近轴传输,可以认为光线平行于光纤主轴、垂直于光纤端面入射到 F-P 光纤传感器腔内,从而可得反射干涉条纹对比度  $\gamma$  与腔长  $d$  的关系为<sup>[14]</sup>

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2(1 - d)\beta(2d)}{1 + (1 - d)^2 \beta^2 (2d)}. \quad (2)$$

典型的传感器高斯光束波长为  $1550$  nm,采用单模光纤的直径  $l = 2a = 8.25$   $\mu\text{m}$ ,光纤的数值孔径  $NA = 0.13$ ,将光纤与空气接触的端面反射率设定为  $R \approx 4\%$ 。得到的腔长  $d$  的变化与反射光的干涉对比度  $\gamma$  的关系曲线如图 1 所示。

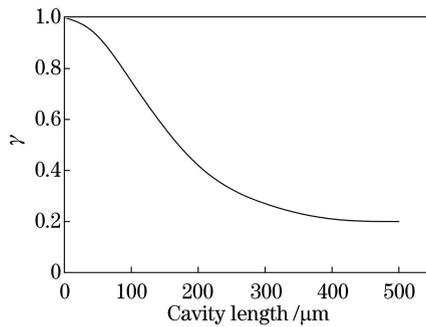


图 1 F-P 传感器对比度随腔长的变化

Fig. 1  $\gamma$  of F-P sensor versus cavity length

从图 1 可知,当腔长在  $100$   $\mu\text{m}$  以内时,对比度保持在  $0.6$  以上;当腔长为  $100 \sim 200$   $\mu\text{m}$  时,对比度在  $0.4$  左右;当传感器的实际腔长增加到  $200$   $\mu\text{m}$  以上时,反射光的干涉对比度会降低到较低水平,因此在制作 F-P 光纤传感器时要尽量使传感器腔长保持在  $200$   $\mu\text{m}$  以内。

当初始光源入射到腔内的光强  $I_0$  和传感器腔长  $d$  确定时,(1)式可以简化为

$$I = A + B \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \pi\right), \quad (3)$$

式中  $I$  为干涉频谱的总强度,  $A = I_1 + I_2$ ,  $B = 2\sqrt{I_1 I_2}$ ,  $n$  为 F-P 干涉仪腔内填充物的折射率,  $d$  为 F-P 干涉仪的实际腔长,  $\lambda$  为自由空间光波长。此时 F-P 干涉仪的实际腔长是固定的, F-P 干涉仪的绝对光程差  $nd$  直接取决于待测物质的折射率。

F-P 干涉仪的绝对光程差  $nd$  可通过交叉相关的信号处理技术准确求得, 从而实现被测物质折射率的绝对测量。将不同腔长值的虚拟干涉光谱信号与所采集到的非本征法布里-珀罗干涉仪 (EFPI) 光纤传感器的归一化干涉光谱信号进行交叉相关运算, 得到两者的交叉相关系数。交叉相关系数最大的虚拟归一化干涉光谱信号的腔长值就是真实待测 EFPI 传感器的腔长值<sup>[15]</sup>。利用交叉相关的信号处理方式, 可以求出 F-P 干涉仪的绝对光程差  $nd$ 。当腔内填充物为空气时, 折射率  $n_{\text{air}} \approx 1$ , 即有  $n_{\text{air}} d \approx d$ , 此时测得 F-P 干涉仪的绝对光程差可以近似作为 F-P 腔的实际腔长。当腔内有其他待测物体时, 测得的绝对光程差为  $n_0 d$ , 与之前测得填充物为空气时的实际腔长  $d$  相除即可得到待测物体的折射率  $n_0$ , 从而实现对待测物体折射率的绝对测量。

### 3 光纤 F-P 干涉仪结构和制作过程

#### 3.1 传感头的结构和制作过程

制作的光纤 F-P 干涉仪结构如图 2 所示。将两段单模光纤固定在中心有缺口的空心毛细管中, 两段光纤端面形成两个反射镜, 进而形成一个开放式 F-P 干涉仪, 实现对待测物体折射率的绝对测量。

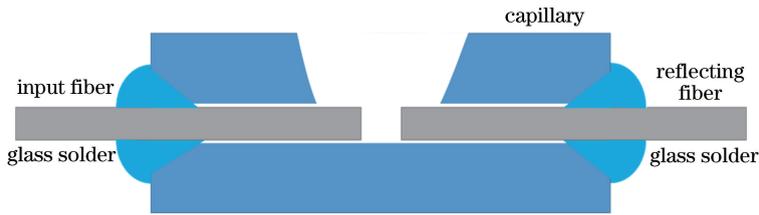


图 2 光纤 F-P 干涉仪的基本结构

Fig. 2 Basic structure of optical fiber F-P interferometer

传感器的制作过程如下。

1) 在空心毛细管表面刻出缺口。由于传感器的主要功能是测量折射率, 因此在测量液体折射率时需要将液体注入 F-P 干涉仪的空腔内部。空心毛细管除了两侧有锥形入口外, 内部是完全封闭的, 需要人为制造缺口以使待测物质进入。使用金刚锉在毛细管的中间部分打磨出一个缺口, 形成一个开放式 F-P 干涉仪。用金刚锉打磨后的毛细管内部会存在玻璃碎屑, 需要用超声波清洗器对打磨后的毛细管进行清洗。

2) 搭建工作平台。空心毛细管部分制作完成后, 在焊接毛细管和光纤的过程中需要搭建一个垂直工作平台。在光学平台上放置两个底座, 在其中一个底座上竖直放置两个光纤调节架, 在另一个底座上放置一个固定空心毛细管的夹具, 肉眼观察调整使三者在竖直方向成一条直线。

3) 通过工作平台固定光纤和毛细管。首先将一根光纤连接到 SM125 光纤传感解调仪上, 将此光纤放置在下方的光纤调节架上, 把不需要接收干涉光的第二根光纤安装在上面的光纤调节架上。调整固定毛细管光学底座的位置, 调节光纤调节架使毛细管与下方光纤架内部的光纤处于一条直线上。旋动进给量调节端, 使光纤尽可能地以无应力状态进入空心管内部, 同时用显微镜在侧面观察, 使光纤端面恰好在毛细管缺口处。固定好毛细管和下方光纤后, 再将上方光纤架的光纤按同样的方法插入毛细管的空腔内, 使两段光纤在毛细管缺口处形成 F-P 干涉仪。

4) 观察光谱, 利用玻璃焊剂将光纤和毛细管焊接在一起。当两根光纤全部进入空气腔内时, 通过解调仪的处理得到 F-P 干涉仪返回干涉光的干涉图谱。观察到稳定的干涉条纹后, 进行光纤与毛细管的焊接。使用热风枪和玻璃焊剂将光纤和毛细管焊接在一起, 玻璃焊剂的熔点是  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当上方光纤焊接完成, 待干涉光谱稳定后, 重新调换上下两个光纤的位置, 再将另一端光纤插入并进行焊接。待干涉光谱稳定后, F-P

干涉仪折射率传感器制作完成。采用玻璃焊剂进行固定,可实现传感器的整体无胶化,使其稳定性更好。光纤 F-P 干涉仪折射率传感器的实物如图 3(a)所示,光学显微镜下放大的 F-P 腔如图 3(b)所示。

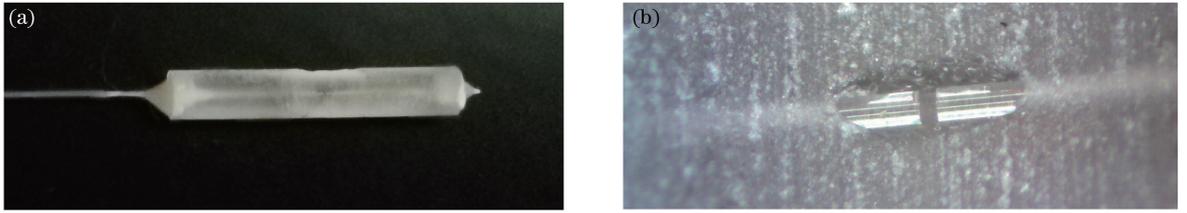


图 3 光纤 F-P 干涉仪折射率传感器。(a)实物图;(b)光学显微镜下的 F-P 腔

Fig. 3 Fiber F-P interferometer in refractive index sensor. (a) Physical map; (b) F-P cavity observed under optical microscope

传感器制作采用的原材料包括单模光纤、锥形端口空心毛细管以及玻璃焊剂。其中毛细管内径为  $126\ \mu\text{m}$ ,外径为  $2.5\ \text{mm}$ ,长度为  $14.5\ \text{mm}$ 。毛细管与光纤之间有  $1\ \mu\text{m}$  的空隙,由于液体表面张力的作用,液体不会进入空隙中,同时充满 F-P 腔的液体也会阻塞空气进入腔内,因此缝隙不会对实验结果产生影响。

### 3.2 传感头退火

在传感器制作过程中,将玻璃焊剂涂抹于毛细管锥形口,用热风枪加热玻璃焊剂将光纤与毛细管固定。当焊接完成后,焊剂会急速冷却固化。但是固定后的光纤与毛细管连接处会存在残余应力,残余应力的缓慢释放将引起传感器的腔长变化,造成测量结果产生偏差<sup>[16]</sup>。因此传感器在使用前应进行退火,释放传感器内部的残余应力,以使传感器的结构达到稳定状态并应用于实际测量当中。

应力释放过程主要发生在传感器处于较高温度时,要对传感器进行几次升降温测试以除去传感器内部的残余应力,使传感器达到稳定结构。

## 4 折射率和温度稳定性实验

采用制作的 F-P 干涉仪折射率传感器进行折射率测量和温度稳定性实验。

F-P 干涉仪折射率传感器的入射光纤与 SM125 光纤传感解调仪相接,光源的中心波长为  $1550\ \text{nm}$ ,光谱宽度为  $80\ \text{nm}$ ,波长范围为  $1510\sim 1590\ \text{nm}$ 。解调仪连接电脑,通过解调程序中的交叉相关算法可得到 F-P 干涉仪的绝对光程差,并计算出待测液体的绝对折射率。实验过程中通过光学显微镜观察待测液体进入开放式 F-P 腔中的情况。整体实验装置如图 4 所示。

光纤 F-P 干涉仪传感器连接光纤传感解调仪,经过计算得到腔长的真实值为  $95.818\ \mu\text{m}$ ,待测物为空气和盐溶液(浓度为  $3.6\ \text{mol/L}$ ,折射率为  $1.3623$ )时的干涉光谱如图 5 所示。

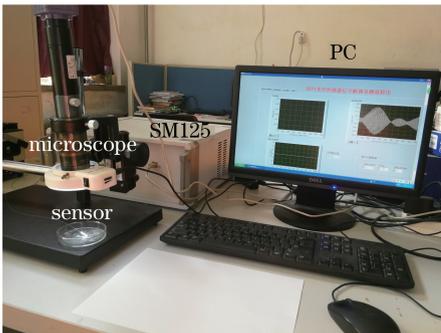


图 4 F-P 干涉仪折射率传感系统

Fig. 4 Refractive index sensing system with F-P interferometer

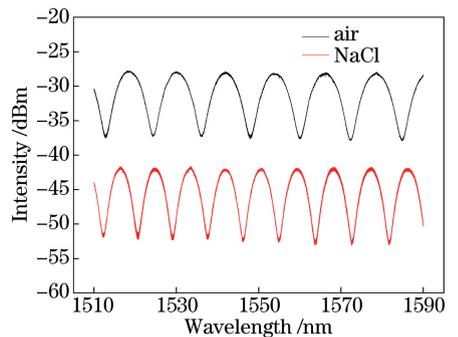


图 5 光纤 F-P 干涉仪的干涉光谱

Fig. 5 Interference spectra measured by the fiber F-P interferometer

### 4.1 折射率测量

配制 6 种不同浓度的盐溶液,并用阿贝折射仪测量其折射率。盐溶液的浓度分别为  $3.60, 1.80, 0.90, 0.45, 0.22, 0.11\ \text{mol/L}$ ,折射率分别为  $1.3623, 1.3469, 1.3375, 1.3361, 1.3337, 1.3322$ 。通入这 6 种不同浓度

的盐溶液进行折射率测量,先测量低浓度盐溶液的折射率,每次测量结束后用等离子水冲洗,完全风干后通入下一种盐溶液。折射率传感器和阿贝折射仪的测量结果对比如图 6 所示。

图 6 中红色曲线是光纤 F-P 干涉仪折射率传感器的测量结果,黑色曲线是阿贝折射仪的测量结果,二者测量数值的差值都在 0.001 RIU 以内。小数点后第 4 位作为阿贝折射仪估读的最后一位,F-P 折射率传感器与阿贝折射仪的测量结果有细微差别是可以接受的,是可允许的系统偏差。阿贝折射仪的测量结果只是作为实验结果的对照参考。

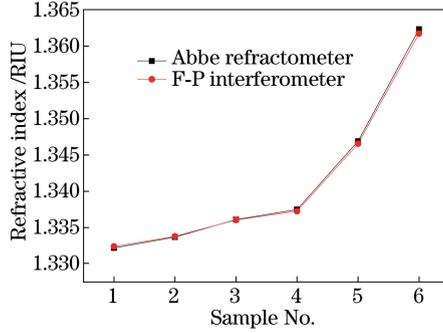


图 6 F-P 干涉仪折射率传感器和阿贝折射仪的测量结果对比

Fig. 6 Comparison of measurement results between refractive index sensor with F-P interferometer and Abbe refractometer

基于交叉相关算法可以得到 F-P 干涉仪的绝对光程差  $nd$ ,分辨率可以达到 1 nm,制作的传感器的有效腔长约为 100  $\mu\text{m}$ 。F-P 干涉传感器的分辨率为

$$\delta_{\text{RI}} = \frac{\Delta(nd)}{nd} = \frac{\Delta n \cdot d}{n \cdot d}, \quad (4)$$

式中  $\delta_{\text{RI}}$  为传感器分辨率; $nd$  为制作的传感器的有效腔长,会因待测物质的变化而在 100  $\mu\text{m}$  左右变化; $\Delta(nd)$  为传感器可分辨的最小腔长,即 1 nm,由此可得传感器的分辨率为  $1 \times 10^{-5}$  RIU。当腔内填充物为空气时,传感器的腔长为 95.818  $\mu\text{m}$ ,通入 0.11 mol/L 的盐溶液后,传感器的腔长变为 127.668  $\mu\text{m}$ ,待测物的折射率由约 1 RIU 变为 1.3324 RIU,可以得到传感器的折射率灵敏度约为  $10^5$  nm/RIU。

#### 4.2 温度稳定性实验

在制作光纤 F-P 干涉仪传感器的过程中,玻璃焊剂与光纤和毛细管的材质并不相同,热膨胀系数不同,因此传感器对温度变化可能会比较敏感。为此进行温度稳定性实验,计算传感器的温度敏感度。在实验中使用的空心毛细管的材质为玻璃,玻璃的热膨胀系数为  $7.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。在实际应用中,为了增加光纤纤芯的折射率,在制作光纤纤芯时添加少量金属锆,使用的单模光纤掺锆后热膨胀系数变为  $5.7 \times 10^{-7} \sim 6.0 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。F-P 干涉仪传感器在室温下的真实腔长为 95.818  $\mu\text{m}$ ,在待测物为空气时腔长值随温度的变化如图 7 所示。

图 7 中红色线是加热升温曲线,黑色曲线是降温曲线,二者趋势基本相同,可以看出腔长与温度基本呈线性关系,在 18~140  $^\circ\text{C}$  温度范围内经过一次升温 and 降温,传感器腔长的变化为 4.83  $\mu\text{m}$ ,由此可以得到传感

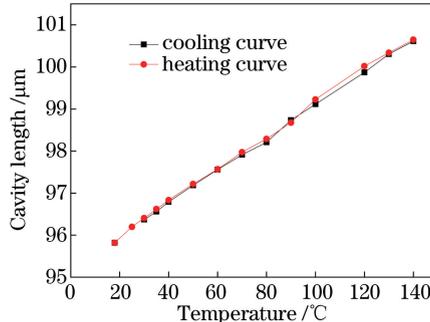


图 7 F-P 干涉仪传感器温度稳定性

Fig. 7 Temperature stability of sensors with F-P interferometer

器的温度灵敏度为  $39.59 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 温度灵敏度和折射率灵敏度相除可以得到温度产生串扰的灵敏度为  $3.959 \times 10^{-4} \text{ RIU}/^\circ\text{C}$ 。制作的传感器温度灵敏度比较高, 对温度很敏感, 实验时温度的变化会对实验结果产生一定的影响, 所以当测量折射率时要尽量控制外部环境的温度变化, 保持温度不变, 提高折射率测量的准确性。

## 5 结 论

利用玻璃焊剂将开放的空心毛细管和两段单模光纤焊接在一起, 制成开放式 F-P 干涉仪传感器, 实现传感器的整体无胶化, 并采用交叉相关的信号处理技术实现对待测液体折射率的绝对测量。传感器本身结构简单, 易于制作, 并且无需标定, 可以得到液体折射率的绝对值。先测得传感器的真实腔长  $d$ , 通入待测液体后, 求得此时的绝对光程差  $n_0 d$ , 二者相除即可得到折射率的绝对值  $n_0$ 。通入不同折射率的盐溶液进行测量, F-P 干涉仪折射率传感器测得的折射率绝对值与阿贝折射仪的测量值相比, 二者的差值在  $0.001 \text{ RIU}$  之内, 传感器的分辨率可达到  $10^{-5} \text{ RIU}$  量级, 折射率灵敏度约为  $10^5 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。传感器的温度稳定性实验显示其温度灵敏度较高, 为  $39.59 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 需要保持外部环境的温度不变来提高折射率测量的稳定性。下一步研究期望选用新的焊料降低传感器的温度灵敏度, 提高其稳定性。完善后的传感器可以应用于生物化学领域, 也可以测量海水盐度。

## 参 考 文 献

- [1] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: An overview[J]. Sensors and Actuators A, 2000, 82(1/2/3): 40-61.
- [2] Zhang Weichao, Zhao Hong, Chu Xiong. Partial discharge acoustic emission sensor design based on extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406002.  
张伟超, 赵洪, 楚雄. 基于非本征光纤法布里-珀罗干涉仪的局放声发射传感器设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406002.
- [3] Liao Yanbiao. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] Clark P, Boriniski J, Gunther M, *et al.* Modern fibre optic sensors[J]. Smart Materials Bulletin, 2001, 2001(6): 8-11.
- [5] Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, *et al.* Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506002.  
付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506002.
- [6] Wang Xiaona. Study on the optical fiber EFPI sensor system and its applications in gas and oil well[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.  
王晓娜. 光纤 EFPI 传感器系统及其在油气井中应用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [7] Cao Xiao, Wang Shuang, Liu Kun, *et al.* Research on nonlinear distortion effect in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 040402.  
曹潇, 王双, 刘琨, 等. 光纤法布里-珀罗传感解调中信号非线性失真的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 040402.
- [8] Shen F B, Huang Z Y, Zhu Y Z, *et al.* Frequency-division-multiplexed Fabry-Perot interferometric fiber sensors for temperature monitoring in a selective catalytic reduction unit[C]. SPIE, 2005, 5998: 59980H.
- [9] Xu J C, Wang A B. Optical fiber sensors for harsh environments: US7173713[P]. 2007-02-06.
- [10] Jung E J, Lee W J, Kim M J, *et al.* Air cavity-based Fabry-Perot interferometer sensor fabricated using a sawing technique for refractive index measurement[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 017104.
- [11] Liu Y, Qu S L. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown for refractive index sensing[J]. Applied Optics, 2014, 53(3): 469-474.
- [12] Kang Haigui, Wang Pingrang, Sun Hequan. Research on the application of cross-correlation technology in marine engineering [J]. Journal of Ocean Technology, 2003, 22(4): 58-61.  
康海贵, 王平让, 孙鹤泉. 互相关技术在海洋工程中的应用研究[J]. 海洋技术学报, 2003, 22(4): 58-61.
- [13] Han M, Wang A. Exact analysis of low-finesse multimode fiber extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. Applied Optics, 2004, 43(24): 4659-4666.
- [14] Jing Zhenguo. Study on white light extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor and its applications[D]. Dalian:

Dalian University of Technology, 2006.

荆振国. 白光非本征法布里-珀罗干涉光纤传感器及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

- [15] Belleville C, Duplain G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. Optics Letters, 1993, 18(1): 78-80.
- [16] Gao Yukui, Zhang Zhigang. Measurement and simulation methods of residual stresses[J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(4): 251-254.
- 高玉魁, 张志刚. 残余应力的测量与模拟分析方法[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(4): 251-254.