

文章编号: 0253-2239(2006)11-1614-5

# 非本征敏感法布里-珀罗腔高精度光纤液位传感器 输出特性\*

吕 涛<sup>1</sup> 刘德森<sup>2</sup> 何开华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国地质大学数理学院, 武汉 430074  
<sup>2</sup> 西南大学光电技术研究所, 重庆 400715)

**摘要:** 依据光学法布里-珀罗(F-P)腔基本原理,分析了非本征敏感法布里-珀罗腔光纤液位传感器工作原理及设计方案。实验结果表明,传感器具有良好的多周期输出特性和局部的线性特性,但法布里-珀罗腔输出光强幅度随腔长增大逐渐衰减,传感器输出特性曲线中不同部分相同长度的线性工作区间却对应不同的测量量程和灵敏度。改变传感头中敏感组件的尺寸可满足对不同液位测量的需要。本传感器最大量程为 20 m,精度为 $\pm 0.5$  mm,最小分辨力为 0.3 mm。传感器特别适用于对易燃易爆液位精确测量,具有很强的实用性。

**关键词:** 光纤传感器; 敏感法布里-珀罗腔; 液位; 腔长损耗

中图分类号: TP212 文献标识码: A

## Output Characteristics of High-Precision Optical Fiber Liquid-Level Sensor Based on Extrinsic and Sensitive Fabry-Pérot Cavity

Lü Tao<sup>1</sup> Liu Desen<sup>2</sup> He Kaihua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074  
<sup>2</sup> Institute of Optoelectronics Technology, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** According to fundamental principle of optical Fabry-Pérot cavity, the work principle and design project of optical fiber liquid-level sensor based on extrinsic and sensitive Fabry-Pérot cavity are analyzed. The experimental results indicate that the sensor possesses good characteristics of several periodicities output and partial linearity. But output intensity of the F-P cavity attenuates gradually with increase of cavity length, and the same length linear work intervals in different segments of output characteristic curve of the sensor correspond with different measurement ranges and sensitivities. The sensor can satisfy requirements for measuring different liquid-level by changing dimension of sensitive module in the sensing head. Precision of  $\pm 0.5$  mm and minimal resolving power of 0.3 mm over a full range of 20 m are obtained. The sensor can be applied to measure liquid-level of flammable and explosive liquid accurately and has strong practicability.

**Key words:** optical fiber sensor; sensitive Fabry-Pérot cavity; liquid level; cavity length loss

### 1 引 言

随着国民经济的发展和国防建设的需要,石油在能源战略储备的地位越来越重要,迫切需要一种能对储油罐液位进行高精度、大量程、连续监测的传感器,以满足油库信息化管理的需求。当前国内外主要利用光栅方法<sup>[1]</sup>、超声波方法<sup>[2]</sup>、电学方法<sup>[3]</sup>和光学方

法<sup>[4]</sup>制做的液位传感器存在可操作性和连续性差、检测动态范围小、精度不高、不安全等问题。本传感器基于光学法布里-珀罗腔基本工作原理,实行全光传感,研究特定光波条件下光强与液位高度的线性变化关系,在信号处理部分实现光电转换,有利于组成遥测网络实现对液位的信息化管理。

\* 中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划(CUGQNL0614)资助课题。

作者简介: 吕 涛(1977~),男,河南信阳人,硕士,中国地质大学数理学院助教,主要从事光纤传感器和微小光学方面的研究。E-mail: lvtaohn@sina.com

收稿日期: 2006-01-23; 收到修改稿日期: 2006-04-04

## 2 传感器工作原理与结构设计

根据多光束干涉理论,法布里-珀罗腔反射干涉光强为<sup>[5]</sup>

$$I_r = \frac{2R[1 - \cos(4\pi L/\lambda)]}{1 + R^2 - 2R\cos(4\pi L/\lambda)} I_0, \quad (1)$$

$R$  为腔两端面反射率,  $L$  为腔长,  $\lambda$  为入射光波波长,  $I_0$ 、 $I_r$  分别为入射光强和反射干涉光强。由(1)式可看出在特定光波和端面反射率条件下  $I_r$  与腔长  $L$  成近似的余弦函数关系。

由物理学常识可知,均匀液体的压强与液位高度成严格正比例关系。如果液压与  $L$  成正比例变化关系,则液位高度与  $L$  就成正比例关系。法布里-珀罗腔输出特性曲线中的局部线性段( $\lambda/6$  或  $\lambda/4$ ) 选作线性工作区间时,反射干涉光强  $I_r$  与腔长  $L$  成正比例变化关系,通过测量反射干涉光强可实现对液位高度的精确量化。

传感器结构设计如图 1 所示。由两级密封高压油体腔构成缓冲腔,目的是为了减少外界冲击力对敏感腔的损伤。液体通过壳体上的小孔进入,作用在第一级密封油体腔上端的金属弹性片上,由于液体能向各方向无差别地传递液压,经第二级密封油体腔传递液体的压力作用在由应力平衡器和恒弹性硅片组成的敏感组件上,应力平衡器使得液压形成均匀载荷作用在恒弹性硅片上并使之发生轴向微小形变从而有效改变由硅片和单模光纤端面形成的法布里-珀罗腔腔长,形变量的大小取决于恒弹性硅片的有效直径和厚度,所以传感器的灵敏度和量程决定于这两个参量,选择不同参量值可设计不同量程的传感器。当液位高度发生变化时,为保证传感器工作的线性度,恒弹性片微小形变量必须与法布里-珀罗腔输出光强呈线性响应关系,其工作依据的压

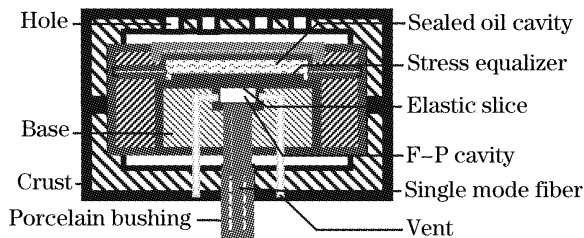


图 1 光纤液位传感器结构示意图

Fig. 1 Configuration of optical fiber liquid-level sensor

力数学模型为(Landau,1965)<sup>[6]</sup>

$$\sigma(r) = \frac{3(1 - \gamma^2)Pr^4}{16Eh^3}, \quad (2)$$

式中  $P$  为压力,  $r$  为硅片有效半径,  $E$  为杨式模量,  $h$  为硅片厚度,  $\gamma$  为泊松比,  $\sigma(r)$  为硅片中心挠度。对于特定材料而言,中心挠度  $\sigma(r)$  与  $P$  成正比关系,从而实现了液位与腔长的线性正比例变化关系。

依据光学谐振腔理论公式,使用尝试法,由计算机对反射面的反射率组合进行计算比较,取舍原则是工作区间即腔的变化范围尽可能大、输出光强的最大最小值差尽可能大,有利于提高精度和分辨力。考虑到细微的光纤端面镀膜及膜系选择的困难,将理论计算和实际镀膜工艺比较,折衷权衡,端面反射率  $R = 0.8$ 。对于法布里-珀罗腔长  $L$ ,首先  $L > \lambda/8$ ,给弹性硅片留足够的形变空间,同时  $L$  也要大于腔的自由光谱范围,初始腔长  $L_0 = 10 \mu\text{m}$ 。对于硅片 ( $E = 1.6 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,  $\gamma = 0.17$ ) 尺寸选择问题上,如果要测量量程为 20 m 水位高度,其对应压强变化范围为  $0 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 。当光源中心波长为 1310 nm,硅片有效半径  $R = 2.5 \text{ mm}$ ,利用法布里-珀罗腔输出  $1/4$  周期即对应硅片形变量为  $\lambda/8$  时,由(2)式可求得硅片厚度  $h = 0.375 \text{ mm}$ ,这样就完成了敏感法布里-珀罗腔参量初设定。制作出的光纤液位传感器如图 2 所示。

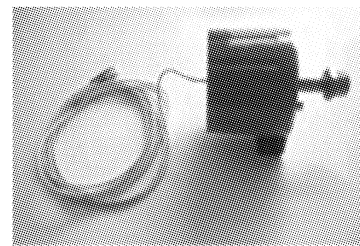


图 2 封装后的光纤液位传感器

Fig. 2 Packed optical fiber liquid-level sensor

## 3 模拟分析

实际光纤法布里-珀罗腔中单模光纤出射的光束为发散光束,且在光纤外部传输,只有部分光能返回入射光纤,从而造成反射耦合的损失,而损失的大小与腔长直接相关。因此,考虑腔长损耗  $\alpha$  后法布里-珀罗腔输出反射干涉光强为<sup>[7]</sup>

$$I_r = RI_0 \left[ 1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right] / \left[ 1 + (R\alpha)^2 - 2(R\alpha) \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right], \quad (3)$$

$$\alpha^2 = 1 - \exp\left[-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(L)}\right], \quad (4)$$

$$\omega_0 = a\left(0.65 + \frac{1.619}{\beta^{3/2}} + \frac{2.879}{\beta^6}\right), \quad (5)$$

$$\omega(L) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{L\lambda}{\pi\omega_0}\right)^2}, \quad (6)$$

$L$  为腔长,  $a$  为纤芯半径,  $\beta$  为光纤归一化频率,  $\omega_0$ 、 $\omega(L)$  分别为光场在光纤和空气中传播的模场半径。当  $\alpha = 1$  时(1)式和(3)式是等价的。

取  $\beta = 2, a = 5 \mu\text{m}, \lambda = 1.31 \mu\text{m}, R = 0.1$  对(1)式和(3)式数值模拟后曲线如图3所示。

从图3可以看出,实际的非本征法布里-珀罗腔输出强度幅度不是等幅的,而是会随着腔长  $L$  的增大而衰减,选择输出曲线中相同周期长度但不同部分的线性工作区间会对传感器性能指标如量程、精度、分辨力等产生影响。

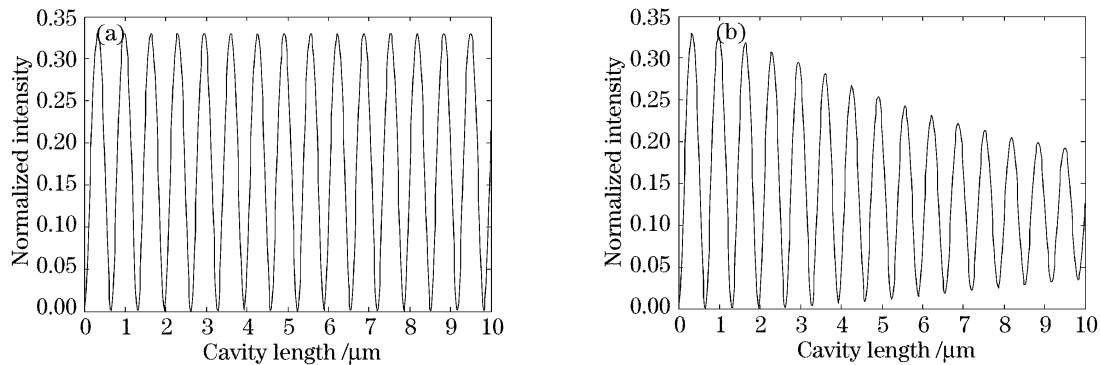


图3 法布里-珀罗腔输出特性曲线。(a)理想无腔长损耗输出,(b)腔长损耗后的实际输出

Fig. 3 Output characteristic curve of F-P cavity. (a) Ideal output without cavity length loss, (b) real output with cavity length loss ( $\alpha$ )

## 4 实 验

为了实验方便,用空气压缩机提供的压缩气体代替液位进行实验(如图4)。

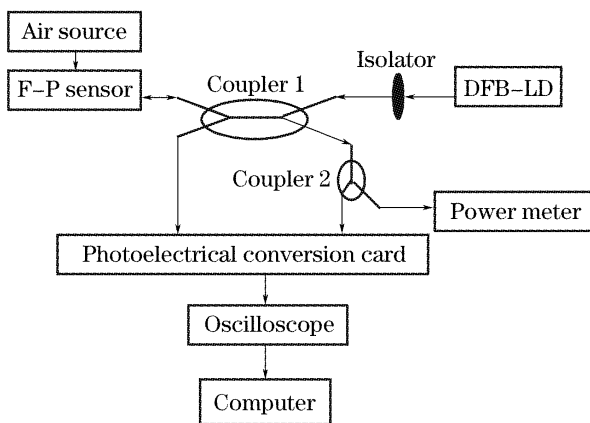


图4 光纤液位传感器实验流程图

Fig. 4 Experimental flow chart of optical fiber liquid-level sensor

通过压力标定仪上的微控制器使空气压缩机可提供连续均匀递增的  $0 \sim 0.7 \text{ MPa}$  压强,也可设置为  $0 \sim 0.7 \text{ MPa}$  中的任一压强。由高稳定性 DFB-LD(GY-II,  $\lambda = 1310 \text{ nm}, P = 1 \text{ mW}, -20 \text{ dB}$  谱宽小于  $0.5 \text{ nm}$ ) 发出的激光经过光隔离器、 $2 \times 2$  单模光纤耦合器分别进入传感器和光电转换卡(此路光

作为参考光),进入传感器的光发生干涉后又经  $2 \times 2$  耦合器和  $3 \text{ dB}$  耦合器分成两束光,一束光被光功率计(SGS-II)直接检测,另一束光作为信号光输入光电转换卡。信号光与参考光经过光电转换卡处理后变成与输入光强  $I_0$  无关的有电信号输入示波器(TEKTROMIX TDS 21),计算机输出结果图。

图5中横坐标为随时间均匀递增的压力  $0 \sim 0.24 \text{ MPa}$  ( $24 \text{ m}$  水柱压强),测试曲线约为  $7/4$  周期。实际测量的传感器变化周期为  $0.14 \text{ MPa}$  左右,与理论计算几乎没有差异,所以  $1/4$  周期对应  $0.035 \text{ MPa}$  压强,一个周期输出对应腔长的形变量为  $655 \text{ nm}$ 。传感器输出  $1/4$  周期线性曲线如图6所示,

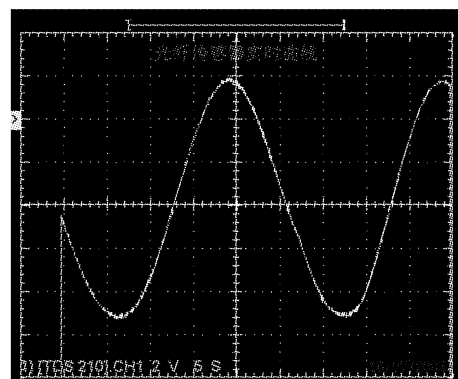


图5 传感器输出实时曲线

Fig. 5 Output real-time curve of the sensor

可见相同周期输出长度却对应不同的压强范围。

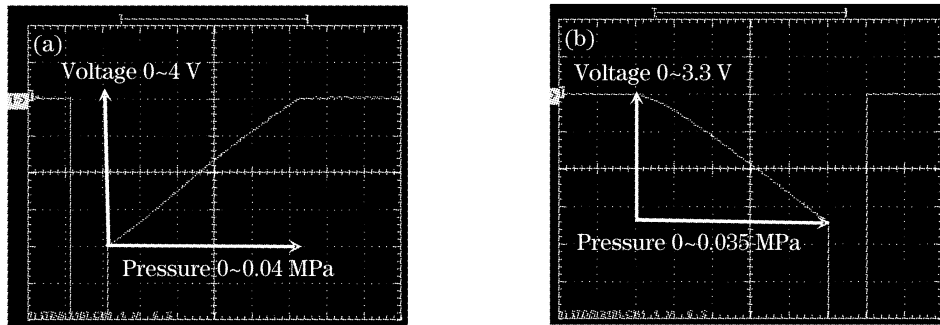


图 6 传感器输出同周期中 1/4 周期长度线性曲线。(a) 上升沿, (b) 下降沿

Fig. 6 Output quarter period linear curve of the sensor in the same period. (a) Rising segment, (b) declining segment

图 7 中整个 BC 段和 CD 段曲线部分对应压力分别为 50.1~130.1 kPa 和 130.1~200 kPa, 所以 1/4 周期对应压力分别为 40 kPa 和 35 kPa, 这说明法布里-珀罗腔输出特性曲线中不同部分相同周期长度线性段对应液体压强不同, 也即腔长改变量不同, 产生的主要原因就是存在腔长损耗。BC 段和 CD 段光强变化范围分别为 1  $\mu\text{W}$  和 1.02  $\mu\text{W}$ , B 点比 D 点光强度高出 0.02  $\mu\text{W}$ , 说明随着液压增大, 腔长变短, 输出光强幅度变大。

不同, 图 8(a) 比图 8(b) 少 0.01  $\mu\text{W}$ 。

图 8 压力变化范围均约为 35 kPa, 但图 8(a) 和图 8(b) 光强变化范围分别为 3.26~3.96  $\mu\text{W}$  和 4.02~3.31  $\mu\text{W}$ 。可见 3.5 m 水压改变法布里-珀罗腔腔长相同, 由于存在腔长损耗使得腔输出光强变化幅度

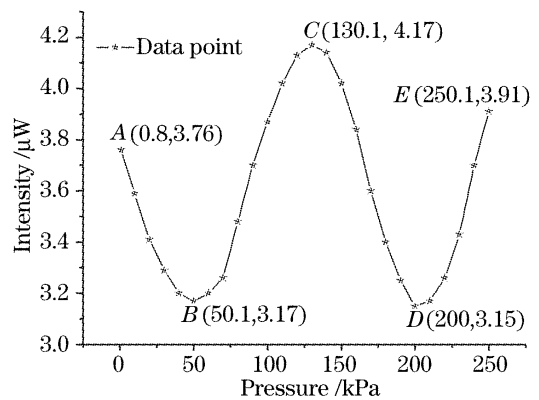


图 7 多周期压力与光强函数关系图

Fig. 7 Schematics of multi-periods relation between pressure and intensity

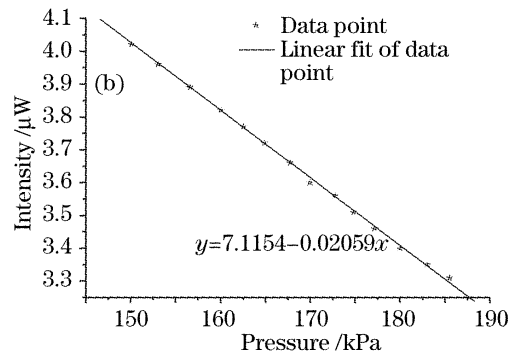
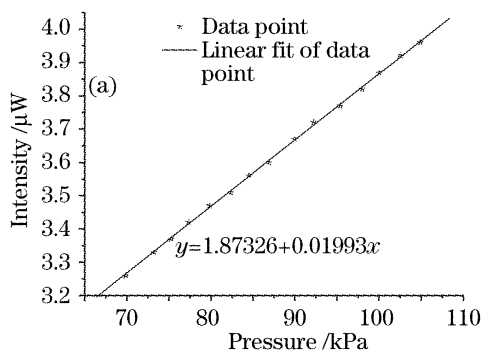


图 8 液压与输出光强关系图(0~3.5 m)。(a) 上升沿, (b) 下降沿

Fig. 8 Schematics of relation between liquid pressure and intensity (0~3.5 m). (a) Rising segment, (b) declining segment

造成传感器精度误差的因素很多, 其中温度效应影响最为显著<sup>[6,8]</sup>。当温度变化时光源的输出光强  $I_0$  和中心波长  $\lambda$  会发生波动, 传感头中法布里-珀罗腔的腔长也会发生微小变化, 从而产生测量误差, 这是强度型法布里-珀罗腔光纤传感器实用化过程中最大的障碍之一。解决温度效应的方法主要有: 1) 光源采用自动温控电路(ATC)和功率控制电路(APC); 2) 选用低膨胀系数的材料作为传感器的基座, 并选用不同膨胀系数的材料作为法布里-珀罗腔的腔臂来抵消

温度效应<sup>[6]</sup>; 3) 法布里-珀罗腔设置通气孔, 保持腔内外气压平衡; 4) 利用双光路加参考臂的方法制作高精度光电转换卡来消除光源波动对测量精度的影响。

### 5 结 论

实验结果充分证明: 1) 法布里-珀罗腔输出曲线为不等幅近似余弦函数关系曲线, 数值模拟结果与实验结果相符合。2) 随着液压增强, 腔长变小, 损耗系数变大, 输出光强幅度微弱增大, 对应 1/4 周期长度

所需压力微弱减小,所以腔长损耗影响法布里-珀罗腔光纤液位传感器的多周期输出特性,进而影响到局部线性工作区间内传感器的性能指标如量程、灵敏度等。3)选择传感器多周期输出特性曲线中的局部1/4周期长度线性段可作为传感器线性工作区间。传感器初始腔长为  $10\ \mu\text{m}$  时,最大量程可达  $20\ \text{m}$ ,精度  $\pm 0.5\ \text{mm}$ ,最小分辨力  $0.3\ \text{mm}$ 。

**致谢** 感谢刘志麟先生的指导与帮助!

### 参 考 文 献

- 1 S. Khaliq, S. W. James, R. P. Tatam. Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 1224~1226
- 2 V. E. Sakharov, S. A. Kuznetsov, B. D. Zaitsev *et al.*. Liquid level sensor using ultrasonic lamb waves [J]. *Ultrasonics*, 2003, **41**: 319~322
- 3 A. Poghosian, J. W. Schultze, M. J. Schoning. Application of a (bio-) chemical sensor (ISFET) for the detection of physical parameters in liquids[J]. *Electrochimica Acta*, 2003, **48**: 3289~3297
- 4 H. Golnabi. Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**: 801~812
- 5 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensing system based on optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 183~186 (in Chinese)  
江 建,饶云江,冉曾令 等. 光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 183~186
- 6 Huang Weirong, Gao Yingjun, Liu Zhilin *et al.*. The temperature compensation design of an optical fiber liquid level sensor with Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1810~1813 (in Chinese)  
黄伟荣,高应俊,刘志麟 等. 温度对光纤法-珀液位传感器腔深度的影响与补偿[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1810~1813
- 7 S. H. Kim, J. J. Lee, D. C. Lee *et al.*. A study on the development of transmission-type extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1869~1874
- 8 Luo Zhiyong, Yang Lifeng, Chen Yunchang. Error evaluateon of cosine dependent algorighm in precision interference measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1629~1633 (in Chinese)  
罗志勇,杨丽峰,陈允昌. 精密干涉测量中余弦依赖算法的误差研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1629~1633