

文章编号: 0258-7025(2004)09-1127-05

基于光纤 F-P 干涉波长的溶液浓度 测量系统研究

姜德生, 魏仁选*

(武汉理工大学光纤传感技术国家重点工业实验基地, 湖北 武汉 430070)

摘要 为了消除光源强度波动对测量结果的影响,根据溶液浓度与其折射率的关系和光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪透射光谱中心波长与干涉仪腔内介质折射率之间的关系,利用其透射光谱的中心波长进行透明溶液浓度的精确测量,开发出测量实验系统。采用可调光学滤波器对传感信号进行采集。对浓度为 5%~80% 的酒精进行了实际测量实验,浓度最大测量偏差为 0.003%。该系统具有如下特点:1) 与 CCD 测量技术相比,采用法布里-珀罗干涉系统透射光谱的波长信号进行溶液浓度测量,可实现连续大范围、高精度测量;2) 消除了光源波动对测量结果的影响,可实现连续高精度测量,且测量范围宽;3) 直接利用光电探测器 PIN 进行传感信号的检测,使系统计算简单;4) 便于实现分布式遥测系统;5) 直接拟合出 F-P 干涉波长与溶液浓度之间的关系,使其更适合于工程实际的应用。

关键词 测量与计量;浓度测量;光纤传感系统;光纤法布里-珀罗干涉仪;波长;折射率

中图分类号 TH 744 **文献标识码** A

Solution Concentration Measurement System Based on Fiber Fabry-Perot Interference Wavelength

JIANG De-sheng, WEI Ren-xuan

(State Key Industrial Experiment Base of Fiber Optic Sensing Technology,
Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract To essentially eliminate the measurement errors arisen from light source power fluctuation, a measurement method of solution concentration was proposed. The method is based on the relationship between transmission optical spectrum central wavelength of fiber Fabry-Perot (FFP) interferometer and the refractive index of medium in the cavity, as well as the relationship between solution refractive index and its concentration. Such a measurement system was developed. A tunable fiber optical Fabry-Perot (F-P) filter was used to collect the sensing data. Different concentrations of a set of alcohol solution, with the concentration being from 5% to 80%, were measured experimentally. The maximum absolute measurement bias is no more than 0.003%. This measurement system possesses following advantages: 1) It can be used to precisely measure the resolution concentration with a large dynamic span, comparing with a system comprises CCD (charge coupled device) camera; 2) it is immune to the fluctuation of light source, and thus a wide range precise and continuous measurement can be achieved; 3) The test system is largely simplified through employing a PIN photodetector to collect the sensing signal directly; 4) It is easy to fulfill a distributed remote measurement; 5) The proposed system is quite suitable for field applications because the concentration of the measurand can be elicited from the light wavelength.

Key words measurement and metrology; concentration measurement; optical fiber sensing system; fiber Fabry-Perot interferometer; wavelength; refractive index

收稿日期:2003-05-12;收到修改稿日期:2003-07-04

作者简介:姜德生(1949—),武汉理工大学光纤传感技术研究中心教授、博士生导师,主要从事光纤传感技术的研究。

* 通信联系人。E-mail:rxwei@mail.whut.edu.cn

1 引 言

溶液浓度是一个重要物理量,在化工、冶金、造纸、制糖、环保行业及科研等领域都常常需要对溶液浓度进行测量。由于溶液的折射率取决于其浓度 C 和温度 T ,因此通过测量溶液折射率来测量溶液浓度是常用的方法之一,同电学方法相比,它既简单又廉价,测量精度高,而且与导电性无关,适合易燃易爆等场所测量^[1~3]。在实际应用中,现有的利用折射率测量溶液浓度的方法具有以下缺点:1) 多以光强度信号或与强度直接相关的量的变化实现被测量的感知,对光源的稳定性要求极高,导致系统复杂而且成本较高;2) 采用 CCD 摄像技术^[4,5],需要复杂的光学及电路系统,测量浓度范围小,通过 CCD 对干涉光谱的识别本质上仍取决于光强信号,而且计算复杂。

法布里-珀罗(F-P)干涉传感系统由于其灵活性和广泛适应性而在传感领域获得了广泛的应用^[6~13],本文设计了一种利用波长干涉法测量溶液浓度的光纤传感系统——光纤 F-P 干涉传感系统,除了具有一般光纤传感系统的优点外,该系统测量结果不受光源强度变化的影响,对光源具有广泛的适应性,使其更适用于工程实际的应用。

2 基于光纤 F-P 干涉波长的浓度测量原理与系统

2.1 测量原理

根据 F-P 干涉仪的干涉特性^[14],当以平行光垂直入射时,干涉透射光谱范围内只有某些特定的波长 λ_k 附近出现干涉极大,且下式成立

$$2nd = k\lambda_k \quad (1)$$

其中 n, d, k, λ_k 分别为 F-P 腔内介质的折射率, F-P 腔长,干涉级次和干涉峰中心波长。

设 F-P 干涉仪腔内介质的折射率为 n_0 时,与其对应的第 k 级干涉峰中心波长为 λ_{k0} ,则由(1)式得折射率 n 与第 k 级干涉峰中心波长 λ_k 之间的关系为: $n = (n_0/\lambda_{k0})\lambda_k$,为讨论方便,略去下标 k 得

$$n = (n_0/\lambda_0)\lambda \quad (2)$$

可见,对特定波长下某干涉级次,光纤 F-P 干涉仪透射峰中心波长的变化与腔内介质折射率的变化成线性关系。

溶液的折射率随溶液浓度的变化而变化。如果将该溶液填充到光纤 F-P 腔内,其折射率的变化必

然使光纤 F-P 干涉仪的干涉圆环发生变化(扩张或收缩),从而改变干涉仪的透射光谱中心波长,当折射率增大时,干涉峰中心波长向长波方向移动;反之,干涉峰中心波长向短波方向移动。因此通过测量光纤 F-P 透射峰中心波长的变化便可测量溶液的折射率。

溶液折射率与浓度之间满足对数混合法则^[4]

$$\lg n_m = [V_1/(V_1 + V_2)] \cdot \lg n_1 + [V_2/(V_1 + V_2)] \cdot \lg n_2 \quad (3)$$

式中 V_1, V_2 分别为混合前溶质和溶剂的体积, n_1, n_2 分别为 20℃ 时溶质和溶剂的折射率, n_m 为混合溶液的折射率。设溶质和溶剂的密度分别为 ρ_1, ρ_2 , 溶液质量为 m , 质量浓度为 c , 则由(3)式可得

$$c(n) = \frac{\rho_1 \ln n_2 - \rho_2 \ln n_m}{(\rho_2 - \rho_1) \ln n_m - (\rho_2 \ln n_1 - \rho_1 \ln n_2)} \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可知,只要检测出光纤 F-P 透射光谱中心波长的位置,就可计算出溶液浓度。

2.2 传感器结构

传感器结构如图 1 所示,由端面分别镀有高反射率透明介质薄膜、固定于玻璃针中的两根单模玻璃光纤组成 F-P 干涉腔,玻璃针经校准、对中后由粘胶固定于准直架上。准直架四周开孔,供待测溶液出入传感腔。

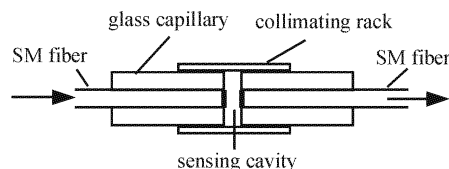


图 1 光纤 F-P 干涉仪结构图

Fig. 1 Schematic diagram for fiber F-P interferometer

为保证干涉仪形成强干涉,直径为 125 μm 的普通单模光纤端面加工和反射面的对准是传感头制作过程中关键的两步^[15]。实验中利用美国 ULTRA TEC 公司的 Ultra Pol 1200 型光纤端面研磨机对光纤端面进行研磨,并利用自制光纤端面视检仪检查表面光洁度和平整度,其检测方法是通过显示屏观察放大 100 倍的光纤端面,表面无瑕疵且无弧度的光纤端面为合格。然后用酒精、乙醚等清洗剂清洗干净,利用电子束真空交替蒸镀二氧化硅/二氧化钛薄膜。用精密微调架进行光纤端面之间距离、平行度、同心调整,调整方法是利用自制三维微调架反复调整构成 F-P 腔的两个光纤端面位置,同时利用 ANDO 公司的 AQ6317B 型光谱仪测量 F-P 干

涉仪透射光谱,当获得的透射光谱干涉峰强度最大、精细度最高时,则认为两光纤端面平行。最后固定于准直架上。光谱仪波长分辨率为 0.01 nm。

2.3 信号采集与处理系统

传感信号的采集和处理,采用可调光纤 F-P 干涉波长作为波长参考基准,检测传感波长信号的变化。传感系统的信号探测部分包括光源、光探测器等部分,如图 2 所示。宽带光源发出的光经光纤耦合到参考干涉仪后,变成一系列特定波长的干涉峰。参考可调光学滤波器(美国 MOI 公司生产,波长分辨率为 1 pm)工作在扫描状态,锯齿波扫描电压调节其干涉光谱中心波长位置,搜索传感信号中心波长位置,当二者重合时光探测器检测到最大光强,该点即为传感信号的中心波长位置。为消除传感 F-P 干涉仪的反射光对参考 F-P 干涉仪的影响,在传感 F-P 干涉仪和参考 F-P 干涉仪之间安装一个光单向隔离器。信号处理部分包括低通滤波器、前置放大电路、峰值检测、触发逻辑和其他相关功能单元。图 2 中光源 SLED 至光电探测器 PIN 之间的连接全部为普通单模光纤。系统中光滤波器的分辨率、光探测器的稳定性及其电源质量和信号处理电路是主要的测量误差来源。

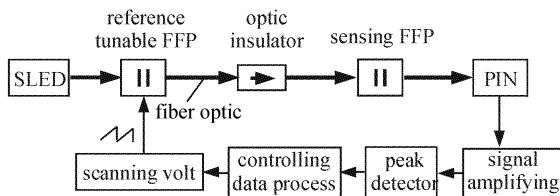


图 2 测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

3 溶液浓度与波长之间关系的标定

虽然(2)式和(4)式给出了溶液浓度与光纤 F-P 干涉仪透射谱中心波长之间的关系,但为了计算溶液浓度需要知道溶质和溶剂的密度、折射率等参数,在实际应用中不方便,而且(4)式计算复杂。因此需要对测量系统进行标定,即寻找溶液浓度与透射光谱中心波长之间的简单解析关系式。研究中利用一组浓度已知的标准酒精溶液,依次测出其对应的透射光谱中心波长,运用下列公式组对浓度与波长之间的关系进行拟合。标准溶液的配制方法是,首先计算出配置一定质量和浓度的溶液所需溶质(乙醇)和溶剂(蒸馏水)的质量,然后利用 TG328B 型分析天平先称量出所需蒸馏水,再向容器中逐渐添加乙

醇,直至达到所需质量。天平称量误差 10^{-4} g。实验测量在 WJT-3 型局部恒温校验台内进行,温度控制在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

需要说明的是,在拟合过程中,发现线性拟合的误差较大(大于 2%),由(4)式可看出折射率与浓度之间是非线性关系,显然溶液浓度与透射光谱中心波长之间也是一种非线性关系。因此采用了二次多项式非线性拟合。拟合方程

$$C = a\lambda^2 + b\lambda + C_0$$

式中 C 为溶液浓度, λ 为透射光谱峰值中心波长, a , b 和 C_0 为拟合常数。

实验中利用 9 组测量数据对浓度与波长之间的关系进行拟合。

由于干涉光谱中心波长与溶液浓度在数值上相差悬殊,为了减小拟合误差,对波长采取了偏置处理,拟合中以 $(\lambda - 1297)$ 代替 λ 。实验所得拟合结果为: $C_0 = -3.7921$, $a = 0.0751$, $b = 4.2440$, 相关系数 R 为 0.999997, 标准差 S 为 0.07423。拟合曲线如图 3 所示。

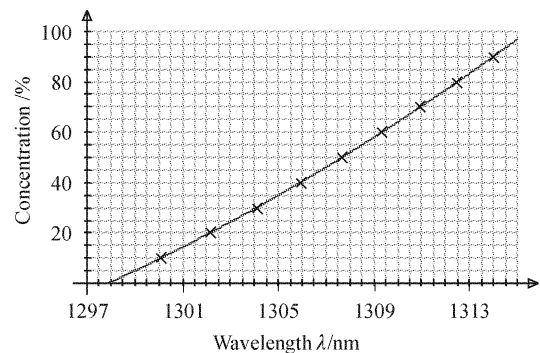


图 3 测量数据拟合曲线

Fig. 3 Regression curve of test data

拟合所得浓度与波长的关系

$$C = -3.7921 + 4.2440(\lambda - 1297) + 0.0751(\lambda - 1297)^2$$

$$(1297.880 < \lambda < 1315.439)$$

拟合方程相关系数为 0.999997,表明回归曲线与实际数据吻合得相当好。实验与拟合数据如表 1 所示。

温度对测量结果的影响,主要是液体随温度升高而产生的体积膨胀,引起密度的降低和折射率的变化。一般而言,液体的温度膨胀系数 α 都很小,在 $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 量级。其密度随温度的变化为

$$\rho' = \frac{1}{1 + \alpha \Delta T} \rho$$

由上式可知,若取 $\alpha = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (绝大多数液体膨胀系数都小于 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),那么温度升高 $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 产生的密度变化小于 0.001% ,这在工程实际中一般是可忽略的。同时,温度变化引起的液体折射率的变化远远小于其密度的变化。因此,工程应用中温度

变化引起的测量误差通常可以忽略。

如果需要非常精确测量特定温度下的液体浓度,可在该温度下对测量系统进行标定,获得此温度下溶液浓度与干涉光谱中心波长之间的关系。

表 1 测量与拟合数据(浓度为质量百分比浓度)($T=20^\circ\text{C}$)

Table 1 Regression and measurement data (mass percent concentration) ($T=20^\circ\text{C}$)

Wavelength ($\lambda - 1297$) /nm	3.084	5.129	7.076	8.926	10.672	12.336	13.940	15.480	17.007
Normal concentration	10.000	20.000	30.000	40.000	50.000	60.000	70.000	80.000	90.000
Regression concentration	10.010	19.951	29.999	40.0250	50.053	59.990	69.963	79.971	90.067
Regression absolute error	0.010	0.049	0.001	0.0250	0.053	0.01	0.037	0.029	0.067

表 2 测量实验结果($T=20^\circ\text{C}$)

Table 2 Test data ($T=20^\circ\text{C}$)

Normal concentration /%	Test 1	Test 2	Test 3	Average concentration	Absolute bias
5.556	5.547	5.562	5.563	5.555	0.001
10.884	10.891	10.886	10.882	10.886	0.002
20.104	20.110	20/106	20.097	20.104	0.000
40.082	40.078	40.073	40.085	40.079	0.003
80.133	80.129	80.131	80.135	80.132	0.001

4 应用结果与讨论

4.1 测量实验

利用上述系统和拟合关系式,对配制的浓度已知的酒精溶液进行了测量实验,溶液配置方法同上,测量同样在恒温箱内进行,结果如表 2 所示。

4.2 测量精度分析

由于系统浓度测量信号是通过光波长信号获取的,因此光源强度波动对测量结果无影响,同时目前的光探测器性能一般很稳定,其信号质量对系统测量结果影响也不大。信号测量的系统误差主要来源于测量系统中可调光滤波的波长分辨率。系统所用可调滤波器波长分辨率为 $\pm 1 \text{ pm}$,根据溶液浓度与光波长之间关系的拟合公式, 1 pm 波长误差引起的百分比浓度误差为 0.0062 ,该误差符合随机分布,因此可通过取多次测量结果的平均值来消除可调滤波器波长分辨率引起的测量误差。表 2 的实验结果充分说明了这一点。可调滤波器扫描控制电压的精度和稳定性是系统测量误差的主要来源,通过多次测量的平均值可部分消除该误差。为了进一步提高系统测量精度,可采取以下措施:1) 设计高稳定性、高精度可调电源,保证可调光滤波器波长分辨率的充分发挥,提高系统对干涉光谱中心波长的分辨率。

2) 改进信号处理软件算法,进一步消除随机干扰产生的误差。3) 改善拟合模型,比如分段拟合、增加数据拟合点数等。

5 结 论

利用光纤 F-P 干涉仪的干涉波长进行溶液浓度的测量,除了具有一般光纤传感系统的特点外,系统测量结果不受光源强度变化的影响,对光源具有广泛的适应性,这在工程实际应用中具有非常重要的意义。在用浓度为 $5\% \sim 80\%$ 的酒精进行的测量实验中,取三次测量的平均值作为测量值,系统浓度实际测量值与标准值之间的绝对偏差小于 0.003 (质量百分比)。其拟合公式仅有四则运算,非常适合单片机进行数据处理。这些特点使系统更具有实用性。利用其他溶液对系统进行标定后,该系统可进行其他溶液浓度的测量。

参 考 文 献

- 1 H. Alause, F. Grasdepot, J. P. Malzac *et al.*. Micromachined optical tunable filter for domestic gas sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 1997, **B43**:18~23
- 2 Sang-Hoon Kim, Jung-Ju Lee, Dong-Chun 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

- 3 Woo-Hu Tsai, Chun-Jung Lin. A novel structure for the intrinsic Fabry-Perot fiber-optic temperature sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5):682~686
- 4 Wang Zhengyan, Yu Zhenghe, Fan Yanbin. Design and application on FFP sensor to measurement of liquid concentration [J]. *Journal of Qingdao University*, 1998, **13**(1):24~29
王正彦,于正河,范延滨. 液体浓度测量 FFP 传感系统的设计与应用[J]. 青岛大学学报, 1998, **13**(1):24~29
- 5 Ye Hong'an, Wang Xi, Chang Cun. Compact liquid-refractive index measuring equipment [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(5):278~280
- 6 F. Marin, L. Conti, M. De Rosa. A folded Fabry-Perot cavity for optical sensing in gravitational wave detectors [J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **309**:15~23
- 7 Mohamed Tariq E. Kahn. Development of a NMLFPE (non-monochromatic lightwave Fabry-Perot) etalon for smart structure sensor applications [J]. *ISA Transactions*, 1999, **38**:337~345
- 8 Lowell Howard, Jack Stone, Joe Fu. Real-time displacement measurements with a Fabry-Perot cavity and a diode laser [J]. *Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2001, **25**:321~335
- 9 Mingzheng Jiang, Edmund Gerhard. A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, **88**:41~46
- 10 T. Liu, G. F. Fernando, Z. Y. Zhang *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **80**:208~215
- 11 J. S. Leng, A. Asundi. Non-destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors [J]. *NDT & e International*, 2002, **35**:273~276
- 12 Yan Dapeng, Zhu Zhaoqing, Wang Zhendong *et al.*. A multi-path F-P interferometric system and its application in three-dimensional refractive index field [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(7):501~505
闫大鹏,朱兆清,王振东 等. 多通道 F-P 干涉系统及其在三维折射率场的应用[J]. 中国激光, 1995, **A22**(7):501~505
- 13 Zhu Ruogu. Experimental research on sinusoidal phase modulating double F-P interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(5):508~512
朱若谷. 正弦相位调制双法布里-珀罗干涉术的实验研究[J]. 光学学报, 1994, **14**(5):508~512
- 14 Mu Guo-guang, Zhan Yuan-ling. *Optics* [M]. Beijing: People's Education Press, 1978. 250~258
母国光,战元龄. 光学[M]. 北京:人民教育出版社,1978. 250~258
- 15 Amarildo J. C. Vieira, Peter R. Herczfeld, Vincent M. Contarino. Linearity study of a Fabry-Perot intensity modulator [J]. *J. Franklin Inst.*, 1998, **335B**(1):109~115



欢迎订阅 2005 年《硅酸盐学报》

《硅酸盐学报》是中国硅酸盐学会主办的有关无机非金属材料领域的综合性学术期刊。1957 年创刊,国内外公开发刊。《硅酸盐学报》为 EI 核心期刊,CA,SA,PJK 收录期刊。

《硅酸盐学报》的任务是报道水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料、人工晶体及非金属矿等各专业在科研、教学、生产、设计方面具有创新性的研究成果,以促进国内外学术交流,为我国四个现代化建设服务。读者对象主要是有关专业工作者及大专院校师生。

《硅酸盐学报》具有正式广告经营许可证。证号为:京海工商广字 0583 号。承办上述专业有关的国内外广告、发布外商来华广告。包括单位介绍和新研究成果、新材料、新产品、新工艺介绍、科技简讯等。《硅酸盐学报》竭诚为各界服务。

《硅酸盐学报》为月刊,国际标准大 16 开,正文 128 页,单价 25 元,全年 12 期共 300 元。邮发代号 2-695。全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系。

地址:北京百万庄中国硅酸盐学会《硅酸盐学报》编辑室 邮编:100831

电话:(010)88376444 传真:(010)68342016

E-mail:jccs@ceramsoc.com

Http://www.ceramsoc.com