

文章编号: 0258-7025(2003)06-0551-04

基于 F-P 干涉波长的折射率测量

魏仁选, 姜德生

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

摘要 利用光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪透射光谱的中心波长与其干涉腔内介质折射率之间的线性关系, 提出一种实现液体/气体折射率精确测量的方法, 消除了光源强度波动对测量结果的影响和量化误差。开发出一套实验系统, 采用可调光滤波器对传感信号进行采集。利用一组不同浓度的酒精溶液对折射率与干涉波长之间的关系进行了拟合, 拟合误差小于 0.00005。对蒸馏水和丙酮折射率的实际测量实验误差小于 0.0001。

关键词 传感器技术; 折射率; 法布里-珀罗干涉仪; 数据拟合

中图分类号 TH 713 **文献标识码** A

Refractive Index Measurement with Fabry-Perot Interference Wavelength

WEI Ren-xuan, JIANG De-sheng

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

Abstract A technique for accurate measurement of the refractive indexes of liquid and gas was proposed. The approach, based on Fabry-Perot (F-P) interferometer and using the central wavelength of transmission spectrum to elicit the measurand, essentially eliminates the errors aroused from light source fluctuation. Such a system was developed. The optical signal was transmitted through fibers, and a tunable optical filter is used to collect the sensing data. Using the test data of refractive indexes of a set of alcohol solution with different concentrations, the analytical relation between refractive index and central wavelength of transmission spectrum was deduced with least squares linear regression method, the regression error is less than 0.00005. Refractive indexes of distilled water and acetone were measured respectively; the measuring error is no more than 0.0001.

Key words sensor technique; refractive index; Fabry-Perot interferometer; data regression

1 引言

折射率是许多工程材料, 尤其是光学材料非常重要的一个参数, 而多数材料手册上给出的材料折射率不但相互不一致, 而且其测量条件如对应的波长、温度等相关条件分散性很大, 给实际应用带来不便。此外折射率还常常是工程上测量透明溶液浓度的重要途径。通常测定液体折射率的仪器是阿贝折射仪和瑞利干涉仪等, 其测量精度虽然高, 但不是普通的常用仪器, 使用时有一定的技术要求。

本文设计了一种利用波长干涉法测量液体/气体折射率的传感系统——光纤法布里-珀罗(F-P)传

感系统, 该系统具有如下特点: 1) 采用 F-P 干涉系统透射光谱的波长信号进行液体/气体折射率测量, 消除了光源波动对测量结果的影响^[1], 可实现连续高精度测量; 2) 直接利用 PIN 进行传感信号的检测, 使系统简单、可靠、经济, 且计算简便; 3) F-P 传感系统为光学系统, 具有抗电磁干扰、耐腐蚀等优点^[2~4], 应用方便、广泛。

2 测量系统设计

2.1 F-P 波长与其腔内介质折射率的关系

根据 F-P 干涉仪的干涉特性, 如果以非单色平

收稿日期: 2002-11-07; 收到修改稿日期: 2003-01-06

作者简介: 魏仁选(1965—), 男, 河南省邓州人, 副研究员, 博士, 主要从事光纤传感技术、光电子器件等方面的研究。E-mail: rxwei@mail.whut.edu.cn

行光入射,则此时入射角 i 固定(它通常是 0 或接近于 0)。由于多光束干涉,使得在很宽的光谱范围内只有某些特定的波长 λ_k 附近出现极大, $i = 0$ 时这些 λ_k 满足下式

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

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 与干涉峰中心波长 λ 之间的关系(略去下标 k)为

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

由(2)式可知,对特定波长下某干涉级次, F-P 干涉仪干涉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。

2.2 系统结构与与设计

传感器结构如图 1 所示,由透镜 L_1, L_2 , 两片反射镜及输入/输出光纤组成,经透镜变换后的平行光在两反射镜之间形成干涉。在传感器结构确定的情况下,透射光谱只与干涉腔内介质折射率有关。传感头的设计中,一方面要保证透镜的平行度和同轴度,提高光耦合效率;另一方面要保证传感头两端不受剪切应力的影响,最好采用温度稳定性好的外壳,以保证传感头的长期稳定性。

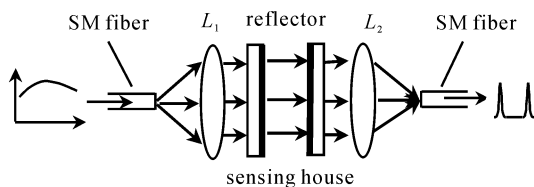


图 1 光纤 F-P 传感干涉仪结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram for fiber F-P sensor interferometer

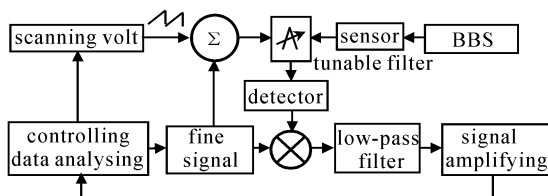


图 2 测量系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

除了传感器外,传感系统的信号探测部分还包括光源、光探测器等部分,如图 2 所示。宽带光源 BBS 发出的光照到传感器后,经传感干涉仪干涉,变成一系列特定波长的干涉峰。可调光学滤波器工

作在扫描状态,锯齿波扫描电压调节其通带,使其通带在一定范围内扫描,在通带内只有一个干涉峰通过,当它扫过某个干涉峰时,相应的干涉光谱信号通过并到达光探测器。由于可调光学滤波器通带与传感干涉仪之间的卷积作用,使测试到的干涉峰谱线展宽,影响了可探测的最小可分辨的干涉峰波长偏移。为此,给可调光学滤波器同时再加上一个细分控制信号,让探测器输出到电混合器和低通滤波装置,它们以细分频率探测输出分量,可得到与光谱分量对应的响应,所得响应在每一个干涉峰的中心波长处都有过零点出现,这样就可大大提高系统的分辨率。系统中光滤波器的分辨率和信号处理电路是主要的测量误差来源。光探测器信号只要在强度足够后续电路读出,其强度上的波动对测量结果无影响。

3 折射率与波长关系的数据拟合

虽然(2)式给出了介质折射率与 F-P 透射谱中心波长之间的关系,但在实际应用中需要首先求出 n_0 和 λ_0 , 即对系统进行标定。研究中利用一组标准酒精溶液,依次测出其折射率,运用下列公式对折射率与波长之间的关系进行拟合。拟合方程为

$$n = a\lambda + n_0$$

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

$$S_m = \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2$$

$$S_{\lambda} = \sum_{i=1}^N (\lambda_i - \bar{\lambda})^2$$

$$S_{n\lambda} = \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})(\lambda_i - \bar{\lambda})$$

$$a = S_{n\lambda} / S_{\lambda}$$

$$S = S_m - a^2 S_{\lambda}$$

$$r = S_{n\lambda} / \sqrt{S_m \cdot S_{\lambda}}$$

$$n_0 = \bar{n} - a\bar{\lambda}$$

式中 n 为溶液折射率, λ 为干涉光谱中心波长, $N = 9$ 。 r 为 n 与 λ 的线性相关系数, S 为标准差, n_0 是回归直线的截距, a 是回归系数。在 $r \rightarrow 1$ 时,回归直线是线性相关的。

由于干涉光谱中心波长与溶液折射率在数值上相差悬殊,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: $a = 0.001027845543$, $n_0 = 1.332026918$, 相关系数 r 为 0.9999975697 , 标准差 S 为 0.0000115 。拟合曲线如图 3 所示。

拟合所得折射率与波长的关系

$$n = 1.33203 + 0.00103$$

拟合方程相关系数为 0.999998 , 表明回归直线与实际数据吻合得相当好。实验与拟合数据如表 1 所示。从表 1 可看出, 折射率最大绝对拟合误差为 0.00005 。

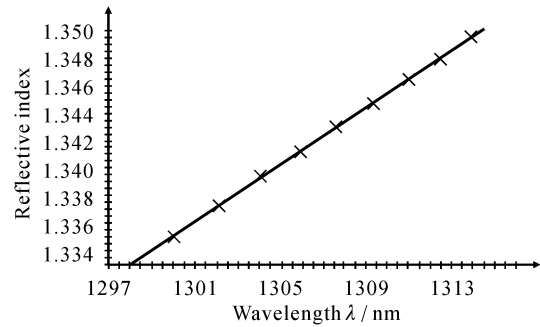


图 3 实验数据的回归曲线

Fig. 3 Regression curve of test data

表 1 实验拟合数据 ($T=25^{\circ}\text{C}$)

Table 1 Regression data

Wavelength ($\lambda - 1297$)/nm	17.007	15.480	13.940	12.336	10.672	8.926	7.076	5.129	3.084
Nominal refractive index	1.34953	1.34792	1.34635	1.34470	1.34300	1.34120	1.33930	1.33730	1.33520
Regression refractive index	1.34954	1.34797	1.34639	1.34474	1.34302	1.34122	1.33931	1.33731	1.33521
Absolute regression errors	0.00001	0.00005	0.00004	0.00004	0.00002	0.00002	0.00001	0.00001	0.00001

表 2 测量实验结果 ($T=25^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1310\text{ nm}$)

Table 2 Test data

Items	Test number					Average refractive index	Max difference between test data
	1	2	3	4	5		
Pure water	1.3329	1.3335	1.3325	1.3338	1.3340	1.33334	0.0015
Acetone	1.3598	1.3602	1.3596	1.3610	1.3603	1.36018	0.0014

表 3 改进系统测量实验结果 ($T=25^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1310\text{ nm}$)

Table 3 Test data of improved system

Items	Test number					Average refractive index	Max difference between test data
	1	2	3	4	5		
Pure water	1.3329	1.3330	1.3329	1.3329	1.3330	1.33294	0.0001
Acetone	1.3591	1.3590	1.3591	1.3590	1.3590	1.35904	0.0001

4 实验与分析

4.1 测量实验

用 $\phi 8\text{ mm}$ 微透镜、自制反射镜置于不锈钢管内构成传感头。用 LED3S412 光源和 PDCS975 同轴光探测器, 可调光滤波器, 自行设计的电路控制、信号处理硬件和软件, 开发了一个测量系统。运用该系统分别对丙酮和水的折射率进行了测量实验。一组测量结果如表 2 所示。水为自制蒸馏水, 丙酮为双四牌分析纯丙酮。测量系统中设计了特殊的峰值检测电路, 能够准确捕捉到干涉峰的极值点, 保证测量精度。

表中最大离散差指各次测量结果之间差值的最

大值。从表 2 可以看出, 测量误差远大于理论拟合值 0.00005 和可调光滤波器 TFFP 波长分辨率 (可达 1 pm) 引起的绝对误差 0.000001 。说明系统中存在其他误差源。由于测量系统是利用干涉波长信号对液体/气体折射率进行测量, 传感器固定于环型不锈钢管内, 一般不会引起干涉腔长的变化, 传感器透镜对准度只在信号强度上有影响, 作为待测信号载体的干涉波长在传感头形成后一般不变。PIN, LED 信号的强度波动也不会影响波长信号, 在实验中观察传感器干涉透射谱, 未发现信号的异常。只有 TFFP 的分辨率和工作稳定性对测量系统的误差具有决定性影响, 分析误差源可能来自于此部分。经检测电路信号, 发现 TFFP 控制电压有波纹噪

声,经对电源采取稳定措施并降低采样频率后,再次测量结果如表 3 所示。

4.2 误差分析与讨论

实验系统可调光滤波器的波长分辨率为 1 pm,约相当于折射率的绝对分辨率小于 0.000001,实测离散差为 0.0001。系统误差主要来源于测量系统中可调光滤波器控制电源噪声。为了提高系统测量精度,可采取以下措施:1) 设计高稳定度、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) 可调光滤波器干涉峰半宽,特别是最大值点附近的曲率是影响系统测量精度的关键因素,宜采用精细度高的光滤波器;3) 改善数据采集与处理系统,消除测量过程中各种因素引起的传感头变形、信号处理系统中电信号的干扰等产生的测量误差;4) 改进信号处理软件算法,进一步消除干扰噪声产生的误差。

5 结 论

根据 F-P 干涉仪干涉腔内介质的折射率与干

涉透射光谱中心波长之间的线性关系,设计出一个简单、实用的液体/气体折射率测量系统,消除了光源波动对测量结果的影响。数据拟合误差不大于 0.00005,实验系统折射率实际测量误差不大于 0.0001。

参 考 文 献

- 1 Sun JiYong, Chen Weimin, Zhu Yong *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(5):596~600(in Chinese)
- 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 Matthew D. Barrett, Ellengene H. Peterson, J. Wallace Grant. Extrinsic Fabry-Perot interferometer for measuring the stiffness of ciliary bundles on hair cells [J]. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 1999, **46**(3):331~339