

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0345-04

用高精度法布里-珀罗干涉仪测量液体的折射率

周 瑜¹, 贾光明¹, 张贵忠¹, 向望华¹, 刘国标², 刘春江²

(¹天津大学精仪学院 国家教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)
²天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要 设计了一个基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪的测量液体折射率(浓度)的传感装置。利用光纤传输激光并用分体 CCD 采集图像,实现了对液体折射率和浓度的高精度测量。从理论上分析了采用平面 F-P 干涉仪实现液体折射率高精度测量的原理和可行性;在实验上构建了由 He-Ne 激光器、单模石英光纤、平面 F-P 干涉仪、面阵分体 CCD 等组成的实验测量装置,通过观察 F-P 干涉仪的同心环的变化数目,即可通过计算得出相应的待测液体的折射率的变化值以及折射率的绝对值。对不同浓度的酒精水溶液的折射率进行了测量。给出了测量过程中的干涉环图样的动态变化过程。实验结果证明,采用该系统可以探测到 10^{-5} 量级的折射率变化量,相应的体积浓度变化量在 0.04% 左右。

关键词 测量;法布里-珀罗干涉仪;液体折射率测量;浓度测量

中图分类号 TN744.3; TH741.4 **文献标识码** A

Using Precision Fabry-Perot Interferometer to Measure Refractive Index of Aqueous Solution

ZHOU Yu¹, JIA Guang-ming¹, ZHANG Gui-zhong¹, XIANG Wang-hua¹,
LIU Guo-biao², LIU Chun-jiang²

¹ Key Lab of Optoelectronic Information Technique and Science, Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² College of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The design and application of a sensing device, based upon Fabry-Perot interferometer, for measuring refractive index of aqueous solution or concentration are presented. It is manifested by a successful measurement of the refractive index of ethanol solution, with fairly high precision, by utilizing a single-mode fiber for laser transmission and a two-unit CCD for image acquisition. Theoretically, the measurement principle and the feasibility of the device are analyzed; and the experimental devices are constructed with a He-Ne laser, a segment of single-mode fiber, an F-P cavity and a CCD head. Through counting the number of the concentric interference rings, with calculation the refractive index and the solution concentration are retrieved with high precision. The dynamic evolution of these rings is demonstrated, corroborating the measurement process. A refractive index change of 10^{-5} and a corresponding concentration variation of about 0.04% are inferred from the measured image data.

Key words measurement; Fabry-Perot interferometer; refractive index measurement of liquid; concentration measurement

1 引言

折射率作为物质的重要光学基本属性之一,在光学领域中具有极其重要的地位。借助折射率,不仅可以了解溶液的光学性能,而且还有助于了解溶液的纯度、浓度以及黏度^[1]等其他物理性质。液体折射率的光学测量方法主要有:测角法, V 棱镜法^[2,3]和干涉法。基于多光束干涉原理的法布里-珀

罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪作为一种极高精度的传感装置,已经被广泛地应用于位移、应变、液体的折射率和浓度等物理量的微小变化的测量^[4~6]。本文设计了一个基于 F-P 干涉仪的测量液体折射率(浓度)的传感装置。实验结果证明,采用该系统可以探测到 10^{-5} 数量级的折射率变化量,相应的体积浓度变化量约在 0.04% 左右。

基金项目: 国家自然科学基金(20476072)和天津市科委基金(043601011)资助课题。

作者简介: 周 瑜(1978—),男,浙江人,天津大学精仪学院博士研究生,主要从事激光测量的研究。

E-mail: yuzhoutj@yahoo.com.cn

2 测量原理

法布里-珀罗干涉仪的基本原理是平行平板的多光束干涉^[7],如图 1 所示。

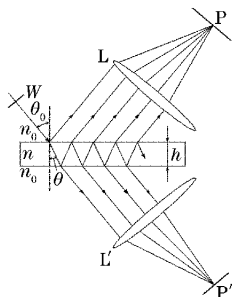


图 1 平行平板的多光束干涉示意图

Fig. 1 Multi-beam interference on an optical slab

从图 1 中可以看到,一束单色光波以 θ_0 角入射至平行平板后,会在平行平板内不断地发生反射和折射现象,而这种多次的反射和折射对于反射光和透射光在无穷远或透镜焦平面上的干涉都有贡献,称之为多光束干涉现象。

如果设 E_{oi} 为入射光电矢量的复振幅,与 P 点(和 P' 点)对应的多光束的出射角为 θ_0 ,它们在平板内的入射角为 θ ,那么相邻两束反射光或透射光之间的光程差为:

$$\Delta = 2nh \cos \theta, \quad (1)$$

相应的相位差为:

$$\varphi = k\Delta = \frac{4\pi}{\lambda}nh \cos \theta, \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可以得出,当

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}nh \cos \theta = 2m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

时透射光形成一套干涉同心环亮条纹。该套同心亮环的干涉级次 m 由中心向边缘逐次降低,中心处的干涉环的级次最高。对于同一个 m 值,由(3)式可以看出,平行平板的折射率 n 与光束倾角 θ 的余弦成反比。由于 $\cos \theta$ 在 $\theta \in [0, \pi/2]$ 范围内为单调减函数,所以 n 与 θ 具有相同的变化趋势。当 n 增大时, θ 也随之增大,干涉同心圆环向外扩张,条纹变密。如果 n 值的增幅足够大,干涉图样的中心位置将会有新一级的干涉圆环产生;当 n 减小时, θ 也随之减小,干涉同心圆环向内收缩,条纹变疏。如果 n 值的减幅足够大,干涉图样的中心位置最高级次的干涉圆环将湮灭^[5]。由此给我们提供了一条测量液体折射率及其变化的思路:将待测液体置于 F-P 干涉仪的腔内,如果可以测得液体折射率变化期间, F-P 干涉仪的同心环干涉图样中心位置处有几个新环冒出,或者

有几个旧环湮灭,就可以通过计算得出相应的折射率的变化值。如果我们知道最初折射率的大小,就可以得出改变后的折射率的绝对值^[8,9]。

由(3)式可得出,当 F-P 干涉仪的同心环干涉图样中心位置处(光束入射角 $\theta=0^\circ$)有干涉极大(即有亮斑)时,干涉腔内介质的折射率 n 与干涉图样中心位置处的干涉条纹级次 m 的关系为

$$n = \frac{\lambda}{2h}m, \quad (4)$$

继而可以得出折射率 n 的变化量 Δn 与干涉级次 m 的变化量 Δm 的关系如下

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2h}\Delta m, \quad (5)$$

从(5)式可以看出,当 $\Delta m = 1$ 时, $\Delta n = \lambda/2h$ 。如果取 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $h = 19.9 \text{ mm}$,干涉图样中心处每变化一个条纹,相应的折射率变化为 1.5852×10^{-5} ,可见基于该原理的折射率测量方案的灵敏度是相当高的。通过实时跟踪干涉条纹的变化,还可实现对折射率的在线实时测量。

溶液折射率与体积分数的关系满足对数混合法则,即

$$\lg n = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \lg n_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \lg n_2, \quad (6)$$

(6) 式中 V_1, V_2 分别为混合前溶质和溶剂的体积; n_1, n_2 分别为溶质和溶剂的折射率; n 为混合液的折射率。在溶剂体积 V_2 不变的前提下,根据(6)式可以求得当溶质体积的变化量为 ΔV_1 时,相应的混合液折射率的变化量 Δn 为

$$\Delta n = \left[n_1^{V_1/(V_1+V_2)} n_2^{V_2/(V_1+V_2)} \frac{V_2}{(V_1+V_2)^2} \ln \frac{n_1}{n_2} \right] \Delta V_1. \quad (7)$$

如果测得溶液折射率的变化量,根据(7)式就可以计算出溶质体积的变化量,进而得出溶液浓度的变化量。这为溶液浓度及其变化量的测量提供了一种有效的测量方法。同时,(7)式也可以对我们所设计的液体折射率测量装置的有效性进行检测。如果采用提前调配好的已知浓度的一系列溶液作为待测样品,利用自行设计的液体折射率测量装置对其进行测量,将测量所得的折射率及其变化量与通过(7)式计算所得的结果进行比较,如果能达到令人满意的符合程度,则说明该套装置是有效的。

将前面得出的 $\Delta n = 1.5852 \times 10^{-5}$ 代入(7)式,并取 $n_1 = 1.3610$ (乙醇), $n_2 = 1.3330$ (水), $V_1 = 1 \text{ mL}$, $V_2 = 100 \text{ mL}$,可得出相应的溶质体积变化量 $\Delta V_1 = 0.0583 \text{ mL}$ 。由此可见,基于该原理的溶液浓

度测量的灵敏度是很高的。

3 实验装置及测量结果

基于上述的理论分析及实际的实验条件,我们自行设计了一套液体折射率的测量装置,如图 2 所示。该系统采用的光源为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光器,功率为 2.5 mW 。激光器发出的光束经过

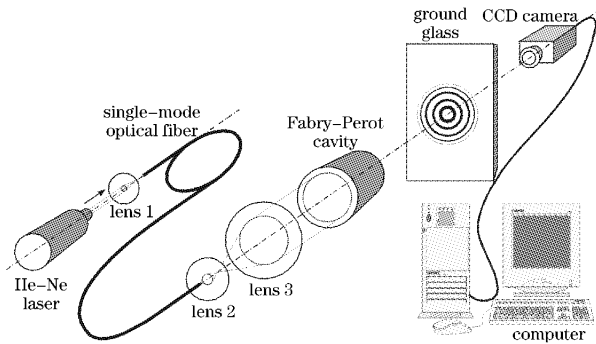


图 2 液体折射率测量装置示意图

Fig. 2 Illustration of the device for measuring refractive index of liquid

焦距为 8.0 mm 的短焦距透镜聚焦进入单模石英光纤内。该单模石英光纤工作波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$,损耗为 4.74 dB/km ,截止波长小于 600 nm ,外径为 $124.6 \mu\text{m}$,长度为 10 m 。

单模光纤的出射光经过透镜 2 和透镜 3 扩束为直径约为 20 mm 的准平行光束,垂直入射至自行设计的 F-P 干涉仪的镜片上,光束中心与镜片的圆心位置基本重合。调整可移动镜片的位置,当两镜片的镀膜平面严格平行时,可在远场位置(毛玻璃上)产生清晰的干涉同心圆环图样。通过 CCD 摄像机进行图像采集,将图像数据传输到计算机中,实现对干涉条纹变化的在线监控。磨砂玻璃的表面与 F-P 干涉仪中镜片的镀膜平面大致相互平行。

采用上述测量装置,我们对溶液的折射率及其变化量进行了实际测量。测量中采用的溶质为工业乙醇(浓度 $> 95\%$), $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 下折射率为 1.3610 。溶剂为纯净水, $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 下折射率为 1.3330 。测量过程如下,用 CCD 采集到一组测量的过程结果图样,如图 3 所示。

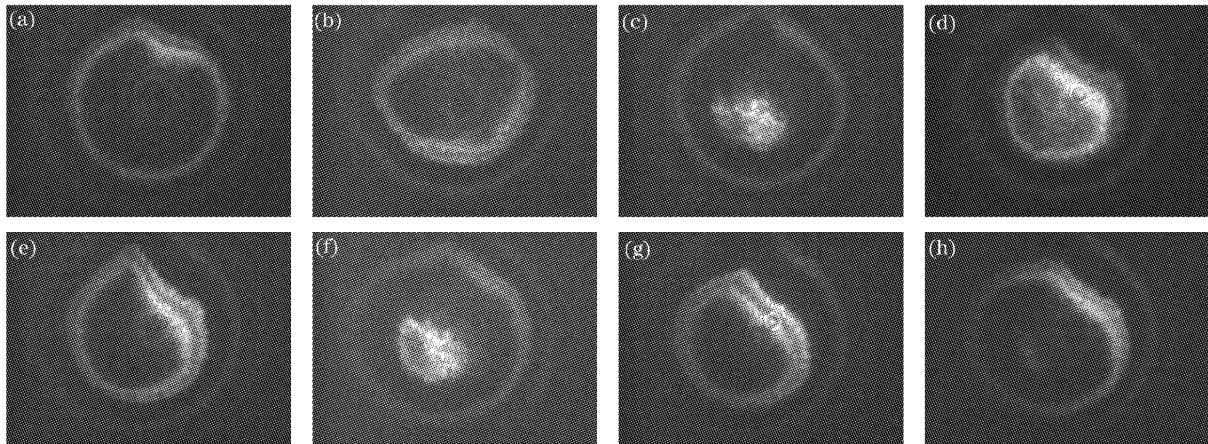


图 3 液体折射率测量过程中的干涉条纹变化图样

Fig. 3 Dynamic evolution of the measured interference-fringe images

测量前先对测量系统进行校准,调整 F-P 干涉仪的可移动镜片的位置及角度,使毛玻璃上能够接收到清晰的同心圆环干涉条纹,如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看到,干涉条纹由两条间隔很近的细条纹组成,这是由于所采用的 He-Ne 激光器所发出的激光是由两个纵模构成而引起的。干涉条纹并非绝对的同心圆环形状,有一定畸变,是由于两个高反射率镜片的反射表面并非绝对平面所导致的,但对本实验的测量过程和结果影响不大;将约 32 mL 的纯净水注入 F-P 腔中,此时可观测到如图 3(b)所示的干涉条纹图样。把图 3(b)与(a)进行比较,可以看

出,同心圆环的环之间的间隔变小,条纹变密。这与前面讨论的理论结果相吻合;使用注射器将一滴工业乙醇滴入 F-P 腔内,每滴乙醇的体积约为 0.004 mL 。 20 min 以后,待溶剂和溶质混合扩散均匀,记录如图 3(c)所示的干涉条纹图样;重复此步骤时,依次得到如图 3(d), (e), (f), (g) 和 (h) 所示的一系列干涉图样。

从图 3(b)~(h)干涉图样的一系列变化中可以看出,干涉环遵循逐渐扩张的趋势不断变化。变化到一定程度时,干涉图样的中心位置又出现新一级的干涉条纹。取图 3(c)~(f)为一个变化周期进行

研究。从图 3(c)可以看出,新一级的干涉条纹刚刚产生,还未扩张成环,在干涉图样中心呈一圆斑形状。经过图 3(d)和(e)的干涉环扩张的变化过程之后,到达(f),完成一个周期的干涉图样变化。从(f)中可以看出,干涉图样的中心又有新一级的干涉条纹刚刚产生,也呈圆斑形状,与(c)中的类似。从(c)~(f)的变化过程中,只产生一级新的干涉条纹,因此 $\Delta m=1$ 。

F-P 腔内两个高反射率镜片镀膜面的间距为 32.5 mm,连同 $\lambda=632.8$ nm 一起代入(5)式,可得出当 $\Delta m=1$ 时, $\Delta n=0.9735 \times 10^{-5}$,可见测量精度是相当高的。从图 3(c)~(f)的变化周期中,总计加入了 3 滴乙醇,总体积为 $\Delta V_1=0.004 \times 3=0.012$ mL。取 $V_1=0.004$ mL[(a)中已经加入了一滴乙醇], $V_2=32$ mL, $n_1=1.3610$ (乙醇), $n_2=1.3330$ (纯净水),代入式(7)进行计算,得出 $\Delta n=1.0389 \times 10^{-5}$ 。与通过测量得出的 Δn 相比,两者相差 0.0654×10^{-5} ,作为对液体折射率测量的初期研究成果,这样的精度是较令人满意的,测量结果是可靠的。经过多次重复实验,测量结果较为稳定,说明该套测量装置的重复性较好。

以上实现的是折射率变化量的测量,对于折射率的测量属于相对测量,即需要知道变化前的折射率大小,再加上测量得到的折射率的变化量,即可得到变化后的折射率绝对值。如果我们在 F-P 腔内仅放入纯净水,调整可移动镜片的位置,使得干涉图样中心位置处刚刚有某一级的干涉圆斑存在(此时腔内液体的折射率已知,为 1.3330),然后改变腔内液体的折射率,通过测量干涉图样的变化得出折射率的变化量,再与液体的初始折射率相加,即可得到

折射率变化后的大小。

参 考 文 献

- Zheng Xiaobing, Zhi Ji. Liquid concentration measurement by the refractive index [J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 1998, **11**(4): 35~36
郑小兵, 之 己. 测量液体浓度的折射率方法 [J]. 光电子技术与信息, 1998, **11**(4): 35~36
- E. Moreels, C. de Greef, R. Finsy. Laser light refractometer [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(17): 3010~3013
- Shen Hailong, Yang Guangming. Error and usage of dove-prism refractometer [J]. *Yunguang Technology*, 1991, **2**: 13~18
沈海龙, 杨观鸣. V 棱镜折射仪的误差和正确使用 [J]. 云光技术, 1991, **2**: 13~18
- Toshihiko Yoshino, Kiyoshi Kurosawa, Katsuji Itoh *et al.*. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(10): 1624~1633
- Wang Zhengyan, Yu Zhenghe, Fan Yanbin. Design and application on FFP sensor to measurement of liquid concentration [J]. *J. 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
- Wei Renxuan, Jiang Desheng. Solution concentration measurement with F-P interference wavelength [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(6): 655~656
魏仁选, 姜德生. 基于 F-P 干涉波长的溶液浓度测量方法研究 [J]. 光电子 • 激光, 2003, **14**(6): 655~656
- M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1978. 421~445
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1978. 421~445
- Wang Yurong, Cai Lüzhong, Wang Qingpu *et al.*. Measurement of the refractive index of liquid using wavefront longitudinal displacement holographic interferometry [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(3): 298~302
王玉荣, 蔡履中, 王青圃 等. 采用波面纵向平移全息干涉测量液体折射率 [J]. 光电子 • 激光, 2000, **11**(3): 298~302
- Zhang Quanfa, Guo Maotian, Yang Haibin *et al.*. Measurement of the refractive index for liquid using CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(3): 229~232
张全法, 郭茂田, 杨海彬 等. 利用 CCD 测量液体折射率 [J]. 半导体光电, 2000, **21**(3): 229~232