

# 容器内液体折射率的低相干光干涉测量法

李振洋, 项华中, 郑刚, 陈明惠, 王成

(上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093)

**摘要:** 提出了一种测量容器内液体折射率的低相干光干涉方法。实验采用宽带低相干半导体激光光源和改进的迈克尔逊干涉仪, 将装有待测液体的容器放入测量臂光路中, 当来自容器前后壁的反射光的光程分别与来自参考臂的反射光的光程相等时, 会出现干涉现象。利用单个光电探测器得到此干涉交变信号, 经计算可求出容器前后壁之间的光程差, 进而得到待测液体的折射率。实验结果表明, 光学延迟套件上反射镜的平移精度可控制在  $5\text{ }\mu\text{m}$  之内, 移动步长为  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 折射率的测量精度可达  $10^{-4}$  量级。此法可用于生物医学检验、食品检验等领域内液体浓度或折射率的实时非接触监测。

**关键词:** 折射率; 干涉; 低相干光

**中图分类号:** TS 261.7; O 436.1 **文献标志码:** A

## Measuring the Refractive Index of Liquid in Containers with an Optical Low Coherence Interferometry

LI Zhenyang, XIANG Huazhong, ZHENG Gang, CHEN Minghui, WANG Cheng

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A method for measuring the refractive index of liquid in closed containers with an optical low coherence interference was proposed. The broadband low coherence laser diode light source and improved Michelson interferometer were used in the experiment. A container with liquid to be measured was placed in the optical path of a measuring arm. When the optical paths of the reflected light from the front and rear walls of the container were equal to the optical path of the reflected light from the reference arm respectively, interference would occur. The alternating interference signal was obtained by using a single photo-detector. By calculation, the optical path difference between the front and rear walls of the container could be obtained, and then the refractive index of the liquid to be measured would be calculated. The experimental results show that the translation accuracy of the reflector can be controlled to  $5\text{ }\mu\text{m}$  within the optical delay line. The accuracy of the refractive index measurement can reach  $10^{-4}$  orders. The method can be used for real-time non-contact monitoring of liquid concentration or refractive index in biomedical, food inspection and other fields.

收稿日期: 2018-01-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61605114)

第一作者: 李振洋(1992-), 男, 硕士研究生。研究方向: 光电测控。E-mail: lizhenyangusst@163.com

通信作者: 郑刚(1962-), 男, 教授。研究方向: 光电测控。E-mail: gangzheng@usst.edu.cn

**Keywords:** refractive index; interference; optical low coherence

折射率是表征物质光学性质的基本物理量之一，在各种光透明物质中，如密度、浓度、温度及应力等物理量的变化均会引起折射率相应的变化<sup>[1]</sup>。在生物医学、食品、医药及化工等众多领域，经常会碰到液体的折射率和浓度的测量问题。目前测量物质折射率的方法有很多，一般分为两类：一类是通过几何光学的方法，以折射反射定律为理论依据，通过精确测量光线在通过材料时的偏折角度来确定材料的折射率，如阿贝折射仪；另一类是波动光学方法，主要利用介质对透射光相位的影响来测定物体的折射率<sup>[2]</sup>，如牛顿环法。近几年在折射率测量方面，国内外的新方法也不断涌现。例如，国内有基于表面等离子体共振传感器的折射率检测法<sup>[3]</sup>、毛细管成像法<sup>[4]</sup>等；国外有基于衍射的传感光栅装置<sup>[5]</sup>、长周期光纤光栅传感器<sup>[6]</sup>、单臂低相干干涉法<sup>[7]</sup>。这些方法在测量液体折射率时，一般都需要将液体取出进行接触式测量，或将液体放置在特制的容器与测量装置内,或对待测样品进行预加工。然而在工业生产和日常生活中，许多液体处在特殊的容器或管道系统中，不便取出，但又需要实时监测液体折射率的变化，以此同步获取液体的其他理化参数<sup>[8]</sup>。如医院里的输液针剂、血液样品，食品工业

中的白酒、食用油，化学工业中的葡萄糖、酒精等，这些液体一般用玻璃瓶或玻璃管密封存放，本方法即针对此类液体提出。

本文利用低相干光干涉的原理，通过测量装有液体的容器前后壁之间的光程差，求得被装液体的折射率。折射率的测量精度可以达到  $10^{-4}$  量级。本文实验操作简便，测量精确，是一种非接触、快速、实时监测的液体折射率测量方法。

1 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示，为改进的采用会聚光路的迈克尔逊干涉系统。半导体激光器 (laser diode, LD) 发出中心波长为 810 nm 的低相干光，此光束依次经聚焦镜 1 (focus lens 1, f1)、针孔光阑 (pinhole)、准直镜 (collimating lens) 到达半透半反镜 (beam splitter, bs)，在半透半反镜上分成两束，一束穿过半透半反镜经聚焦镜 2 (focus lens 2, f2) 会聚到比色皿 (本文所用的模拟容器) 前壁后表面 (或后壁前表面) 上，之后反射，沿原路返回，构成测量臂，形成测量信号光；另一束经聚焦镜 3 (focus lens 3, f3) 聚焦到反射镜 1 (mirror 1, m1) 上，被反射，再沿原路返回，构成参考臂，形成参考光。这

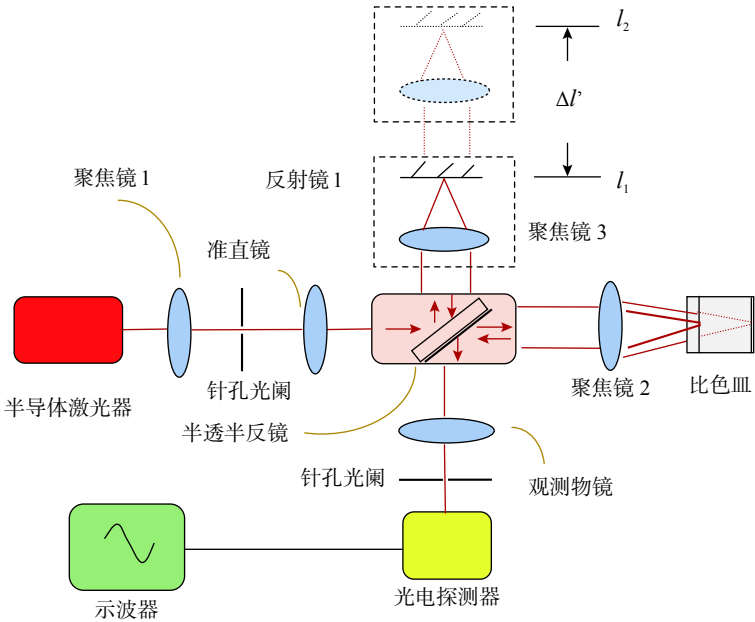


图 1 容器内液体折射率测量系统

Fig.1 Measuring system for the refractive index of liquid in a vessel

两束光通过观测物镜会聚，经光阑到达单个光电探测器。在探测器上，当满足干涉条件时就会出现干涉信号<sup>[9-10]</sup>。m1及f3(两者之间刚性连接)安装在能够精确移动的平移台上(THORLABS公司ODL100-FS(/M)光学延迟套件)，通过电动调节控制m1的位置移动，可以快速改变其光程。光电探测器(photo-detector)将捕获到的光信号转变成电信号，对此信号进行处理或利用示波器(oscilloscope)显示。连续移动m1，当来自参考臂与测量臂的两束光的光程相等时，可以观察到最强的干涉交替信号(即干涉条纹的移动信号)，如图2所示。此时即可确定测量臂的光程改变量，进而得到待测液体的折射率。 $l_1$ 是参考臂初始光程位置， $l_2$ 是测量臂光程变化后对应的参考臂光程位置， $\Delta l'$ 是两者光程差值。

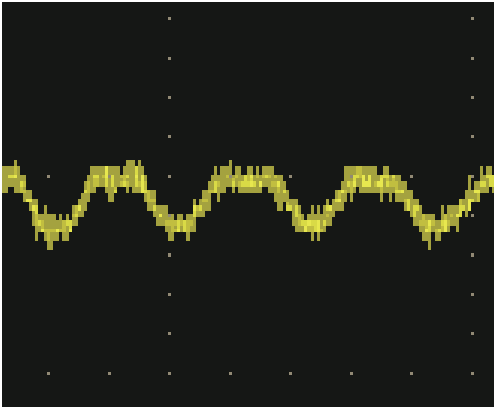


图2 示波器中光干涉信号图

Fig.2 Optical interference signal diagram in oscilloscope

假设从光源发出的光经过半透半反镜分成两束，某一时刻汇合于探测器S点的瞬时光场强度为 $E_1(t-t_1)$ 和 $E_2(t-t_2)$ ，此时， $t$ 时刻S点的总场强度

$$E_S(t) = E_1(t-t_1) + E_2(t-t_2) \tag{1}$$

式中： $t_1=r_1/c$ ， $t_2=r_2/c$ 分别为信号光与参考光到达探测器上S点的时间； $r$ 为光程； $c$ 为光速； $E_S(t)$ 为 $t$ 时刻S点的瞬时光场强度。

对于实际的光场来说，振幅和相位都随时间极迅速地变化，人们能够观测到的是某一段时间间隔内的平均值，因此，可将 $t$ 时刻S点的光强度 $I_S$ 取为

$$I_S(t) = \langle E_S(t)E_S^*(t) \rangle \tag{2}$$

式中： $\langle \rangle$ 为取时间平均； $E_S^*(t)$ 为 $E_S(t)$ 的共轭函数。

将式(1)代入式(2)，可得

$$I_S = \langle E_1(t-t_1)E_1^*(t-t_1) \rangle + \langle E_2(t-t_2)E_2^*(t-t_2) \rangle + \langle E_1(t-t_1)E_2^*(t-t_2) \rangle + \langle E_1^*(t-t_1)E_2(t-t_2) \rangle \tag{3}$$

假定光场稳定，且时间平均值与时间原点的选择无关，并令 $\tau=t_2-t_1$ ，则式(3)可以改写为<sup>[11]</sup>

$$I_S = I_1 + I_2 + 2\text{Re } \Gamma_{12}(\tau) \tag{4}$$

式中： $I_1$ ， $I_2$ 分别为两束光在S点的光强度； $\Gamma_{12}(\tau)$ 为 $E_1$ 和 $E_2$ 的互相干函数； $\text{Re } \Gamma_{12}(\tau)$ 为复函数 $\Gamma_{12}(\tau)$ 的实部。

设入射到探测器的一系列光波的波列长度为 $2L$ ，在 $2L$ 长度范围内波的振幅 $A_0$ 为常数，中心内空间角频率 $k_0$ 为常数。若选择波列的中心为坐标原点，波列函数形式为

$$f(z) = \begin{cases} A_0 \exp(ik_0 z), & -L \leq z \leq L \\ 0, & |z| > L \end{cases} \tag{5}$$

式中： $f(z)$ 为光波函数； $i$ 为虚数单位； $z$ 为波列横轴坐标。

式(5)傅里叶分解的频谱(振幅函数)

$$A(k) = A_0 \int_{-L}^L \exp[-i(k-k_0)z] dz = 2A_0L \frac{\sin(k-k_0)L}{(k-k_0)L} \tag{6}$$

式中， $k$ 为空间角频率。

此时谱强度函数

$$I(k) = \left[ \frac{\sin(k-k_0)L}{(k-k_0)L} \right]^2 \tag{7}$$

光谱强度的第一个零值对应于空间角频率差距 $\Delta k = k - k_0 = \pm\pi/L$ 。实际上，只有在空间角频率 $k_0 - \Delta k/2 \leq k \leq k_0 + \Delta k/2$ 范围内(即 $k_0$ 两边第一个零值之间频宽的一半)，强度才有显著的数值，所以，可取范围

$$\Delta k = \frac{\pi}{L} \tag{8}$$

以此作为有效空间角频率范围。又 $k = 2\pi/\lambda$ ，因此，式(8)可以用空间波长表示为<sup>[12]</sup>

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2L} \tag{9}$$

式中： $\Delta\lambda$ 为光波光谱半高全宽； $\lambda_0$ 为中心波长。

进入干涉装置的波列会分成同样长的2个波列，当光程差大于波列长度时，参考波和测量波的位相已无固定关系，这两列波就不能干涉。因此，相干长度 $L_c$ 为<sup>[13]</sup>

$$L_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \tag{10}$$

本文所用光源的中心波长 $\lambda_0=810\text{ nm}$ ，光源光谱振幅的半高全宽(full width half maximum, FWHM)

$\Delta l=25\text{ nm}$ , 根据式(10)可得相干长度  $L_c\approx 27.7\text{ }\mu\text{m}$ , 其相干长度很小。因此, 在实验中, 当光电探测器出现最大干涉信号时, 可以认为测量臂与参考臂的光程相等。具体实验步骤如下:

**步骤 1** 移动反射镜 m1, 当 m1 反射的光与比色皿前壁后表面反射的光的光程接近时, 探测器会检测到干涉信号, 在示波器上显示的是信号电压的变化。在此过程中记录下干涉信号最强点(示波器上干涉信号强度的电压最大值)处对应的 m1 位置, 并以此位置作为光程的初值  $l_1$ 。在此过程中, 忽略第一次出现的干涉信号, 因为, 此信号为比色皿前壁前表面反射光对应的干涉。

**步骤 2** 继续同一方向移动反射镜 m1, 直到再次出现干涉信号最大值点, 并记录与其相应的位置  $l_2$ , 此信号对应于反射镜 m1 的反射光与比色皿后壁前表面反射光的干涉。显然, 两者之差  $\Delta l'=l_2-l_1$  即为被测液体的光程  $\Delta l$ 。由于  $\Delta l=dn$ ,  $d$  为比色皿的内径。据此可得待测液体的折射率

$$n=\frac{\Delta l}{d}=\frac{l_2-l_1}{d}$$

(11)

由式(11)可知, 求折射率之前, 需知道容器的内径  $d$ 。在未知内径  $d$  的情况下, 也可测得, 因为, 空气的折射率为 1, 只需先将光路对准比色皿上部空隙(气)处, 运用上述步骤及方法求出比色皿内部的光程, 此光程即为内径  $d$ 。

## 2 实验结果与分析

分别对蒸馏水、花生油、菜籽油、大豆油、玉米油和葵花油这几种常见液体进行了折射率的测量, 并预先依次将它们装入比色皿中。按上述步骤, 重复 10 次测量求得比色皿内径  $d$  的平均值为  $10.067\text{ mm}$ , 此比色皿标称内径为  $10\text{ mm}$ , 相对误差为  $0.67\%$ 。为避免温度、湿度及气压等因素的干扰, 实验保证在同一环境下进行。各组重复 10 次测量, 实验数据如表 1 所示。

表 1 常见液体折射率测量表  
Tab.1 Measured values of common liquid refractive index

| 名称  | $l_1/\mu\text{m}$ | $l_2/\mu\text{m}$ | $\Delta l/\mu\text{m}$ | $n$             | $n_0$   | 相对误差/% |
|-----|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------|---------|--------|
| 蒸馏水 | 8 990.0           | 22 357.0±2.0      | 13 367.0±2.0           | 1.327 8±0.000 2 | 1.328 0 | 0.015  |
| 花生油 | 8 990.0           | 23 729.0±3.0      | 14 739.0±3.0           | 1.464 1±0.000 3 | 1.464 9 | 0.055  |
| 菜籽油 | 8 990.0           | 23 746.0±4.0      | 14 756.0±4.0           | 1.465 8±0.000 4 | 1.466 4 | 0.041  |
| 大豆油 | 8 990.0           | 23 765.0±4.0      | 14 775.0±4.0           | 1.467 7±0.000 4 | 1.468 2 | 0.034  |
| 玉米油 | 8 990.0           | 23 769.0±5.0      | 14 779.0±5.0           | 1.468 1±0.000 5 | 1.468 7 | 0.041  |
| 葵花油 | 8 990.0           | 23 777.0±4.0      | 14 787.0±4.0           | 1.468 9±0.000 4 | 1.469 6 | 0.048  |

注: 参考镜 m1 的初始位置已作归一化处理, “±”之前的数值是平均值, “±”之后的数值表示对应平均值的偏差。

蒸馏水在室温、 $810\text{ nm}$  波长处的实测折射率与文献[14]给出的折射率(蒸馏水在  $800\text{ nm}$  波长处对应的折射率为 1.328 0, 在  $850\text{ nm}$  波长处对应的折射率为 1.327)相吻合; 将实测的食用油折射率与文献[15]的实验结论相比较(表 1 中  $n_0$  为文献[15]中对应液体的折射率), 其相对误差在  $0.06\%$  之内。干涉信号比较弱, 容易受外界的震动、电磁等干扰, 所以, 实验时应尽量避免此问题。影响测量精度的主要因素是最强干涉信号出现时对应光程(位置)的读取, 以及可移动反射镜的位移精度。光学延迟套件的水平精度可控制在  $5\text{ }\mu\text{m}$  之内, 移动步长为  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 比色皿内径  $d$  的平均值为  $10.067\text{ mm}$ , 根据式(11)可以得到折射率的测量精

度为  $10^{-4}$  量级。如要提高折射率的测量精度, 可以采用更精确的位移机构或适当增大光源的带宽。在生物医学检验及食品工业的液体质量监控中, 液体折射率的相对变化量(很多情况下也代表了液体的浓度变化量)的检测比折射率本身的测量往往更有意义, 本方法的测量精度能满足这方面的要求。

## 3 结 论

介绍了一种基于低相干光干涉测量容器内液体折射率的方法。光学延迟套件的水平精度可控制在  $5\text{ }\mu\text{m}$  之内, 移动步长为  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 折射率的测量

精度可以达到  $10^{-4}$  量级。与阿贝折射仪的准确度相当, 实验结果与给定的理论值的相对误差在 0.06% 之内。该方法实用可靠、装置简单、测量精度高, 有望应用于生物医学、食品检验、化工及医药等领域内管道或器皿中液体折射率(或浓度)的实时、非接触在线监测。

#### 参考文献:

- [1] 花世群, 骆英, 洪云. 基于等厚干涉原理的液体折射率测量方法[J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1542–1546.
- [2] 汪晓春, 杨博文, 何冬慧. 一种基于迈克尔逊干涉仪测量透明液体折射率的方法[J]. *光学仪器*, 2012, 34(5): 1–4.
- [3] 魏重光, 唐海泉, 营傲群, 等. 基于 SPR 的液体折射率检测研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(21): 62–66.
- [4] LI Q, PU X Y. Measurement of the refractive index of microquantity liquid filled in a capillary and a capillary wall without destruction[J]. *Applied Optics*, 2014, 52(21): 5318–5326.
- [5] CALIXTO S, BRUCE N C, ROSETE-AGUILAR M. Diffraction grating-based sensing optofluidic device for measuring the refractive index of liquids[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 180–190.
- [6] MELO L, BURTON G, KUBIK P, et al. Long period gratings coated with hafnium oxide by plasma-enhanced atomic layer deposition for refractive index measurements[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7654–7669.
- [7] ZILIO S C. Simultaneous thickness and group index measurement with a single arm low-coherence interferometer[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27392–27397.
- [8] 张宗权, 徐铭, 任俊鹏, 等. 封闭玻璃管道内液体折射率的非接触测量[J]. *光学精密工程*, 2016, 34(10): 2408–2416.
- [9] KACHIRAJU S R, GREGORY D A. Determining the refractive index of liquids using a modified michelson interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(8): 2361–2365.
- [10] MACIEL M J, COSTA C G, SILVA M F, et al. A wafer-level miniaturized michelson interferometer on glass substrate for optical coherence tomography applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 242: 210–216.
- [11] 羊国光, 宋菲君. 高等物理光学[M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [12] 梁铨廷. 物理光学[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] 李振洋, 陈明惠, 张浩, 等. 用低相干光干涉法鉴别白酒品质[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(2): 168–172.
- [14] 姜良广, 孙鹏. 水的折射率与波长间函数关系的模型[J]. *光谱实验室*, 2002, 19(4): 554–556.
- [15] 张浩, 陈明惠, 李振洋, 等. 基于低相干光干涉的液体折射率测量[J]. *光学仪器*, 2017, 39(3): 1–5.

(编辑: 石 瑛)