

文章编号: 0258-7025(2006)11-1542-05

基于等厚干涉原理的液体折射率测量方法

花世群, 骆 英, 洪 云

(江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 将空气劈尖的等厚干涉原理与 CCD 图像处理技术相结合, 提出了一种对透明液体折射率进行自动测量的新方法。利用一元线性回归方法对 CCD 的像元序号与所接收到的干涉条纹光强极大值序号之间的线性关系进行拟合, 进而由拟合系数与待测液体折射率之间的关系计算出液体的折射率。为了在测量中获得理想的干涉条纹图, 对影响干涉条纹图像质量的主要因素进行了详细分析, 并给出了具体的背景光消除方法。实验以水为测量对象, 测量结果表明, 新的测量方法是可行的, 测量结果的相对误差为 0.09%, 另外, 新的背景光消除方法, 对其他光学实验中如何获得清晰的干涉条纹, 也具有一定的参考价值。

关键词 测量; 折射率; 干涉; 图像处理

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Measurement of Refractive Index of Liquid by the Equal Thickness Interference

HUA Shi-qun, LUO Ying, HONG Yun

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract A technique for automatic measurement of the refractive index of liquid was proposed. The approach based on the principle of the equal thickness interference of air wedge and charge coupled device (CCD) image-processing technique. The unitary linearity regress method was used to fit the relation between the serial number of the CCD pixels and the serial number of the intensity maximum of interference fringes, and the regress coefficients were used to compute the refractive index of liquid. Some factors affecting the quality of fringe patterns were taken into account and perfect fringe patterns were obtained by removing background light. The experiment result proves the feasibility of the new method. The relative error of the refractive index of water is 0.09%. In order to obtain clear interference fringes in other optical experiment, the new method of removing background light is worthy to be considered.

Key words measurement; refractive index; interference; image processing

1 引 言

折射率是表征光透明物质光学性质的基本物理量之一, 在各种光透明物质中, 诸如密度、浓度、温度、应力等物理量的变化, 均会引起折射率的相应变化。在生产实践中, 通过测定介质内折射率的空间分布和随时间的变化, 进而定性分析乃至定量确定其他的各种相关物理量, 已有许多重要的实际应用^[1], 因此, 对折射率的测量方法研究具有重要的实

际意义。

目前, 折射率的测量方法很多, 常用的有: 1) 使用分光计的最小偏向角法, 该方法虽然测量精度很高(一般能测到 5 位有效数字), 但对待测样品的要求也高, 除了需将样品加工成三棱镜外, 还对所加工成的三棱镜顶角及其中两个平面的平面度有较高的精度要求, 增加了测量成本; 2) 阿贝折射计临界角法, 该方法一般能测到 4 位有效数字, 但计算公式相对复杂, 引起误差的因素较多, 而且要求样品的折射

收稿日期: 2006-03-28; 收到修改稿日期: 2006-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(50375069)资助项目。

作者简介: 花世群(1965—), 男, 江苏人, 江苏大学理学院副教授, 博士, 主要从事光学计量测试方面的研究。E-mail: hsqhmxb@ujs.edu.cn

率不得大于 1.7, 因而对某些样品不能使用; 3) 迈克耳逊干涉仪等倾干涉法^[2~4], 此法用于折射率的测量, 仅限于薄透明体, 且在测量过程中, 由于待测样品和测量光路需反复调整, 因而光路调整复杂, 手工操作强度大, 测量过程时间长, 不利于实现测量过程的自动化; 此外, 还有许多其他测量方法^[5~10], 这些方法中有的需在精确测量透明体厚度前提下才能实现, 有的影响测量结果的因素较多, 使测量精度难以得到进一步提高。本文在充分分析了上述诸多测量方法中所存在的各种局限性的基础上, 提出了一种新的液体折射率测量方法, 该方法基于薄膜的等厚干涉原理与 CCD 图像处理技术的结合, 不仅光路简单、操作容易、自动化程度高, 对被测样品无特殊要求, 而且结果准确, 具有较高的实用价值。

2 测量原理

如图 1 所示, 用两块光学平板玻璃 M_1 和 M_2 构成一个劈尖角为 θ (很小) 的空气劈尖^[11,12]。从 He-Ne 激光器发出的激光束经扩束、滤波后, 被准直成沿水平方向传播的平行光, 再经分光镜 (BS) 后在空气劈尖的前表面入射, 从而在劈尖表面附近形成一系列明暗相间、平行等间距的直条纹, 干涉条纹经显微镜放大后, 由线阵 CCD 检测。当 CCD 接收到光信号时, 它就在驱动脉冲的作用下, 将电荷包信号依次驱动出来, 形成对应于干涉条纹的视频信号。视频信号的一路经图像采集卡直接送入视频监视器, 供光路调节使用; 另外一路经由滤波放大器进行预处理, 再通过 A/D 转换器转换成电信号, 送计算机进行后续图样处理。

设图 1 中光在空气劈尖平板玻璃 M_1 上的入射角为 γ , 则在劈尖中空气层厚度 d 处, 二条相干光的光程差为

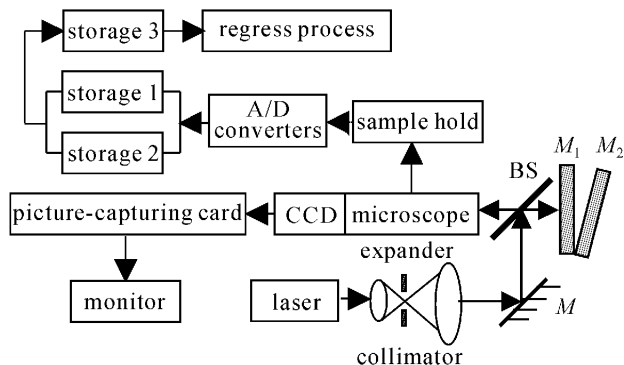


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Sketch of measuring system

$$\Delta = 2d \cos \gamma + \frac{\lambda}{2} = 2(e + \frac{yW\theta}{R}) \cos \gamma + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

其中 e 为常量, λ 为 He-Ne 激光器的波长, y 为 CCD 上的像元序号, W 为 CCD 上相邻二个光敏元中心的间距, R 为显微镜放大倍数。

当入射角 $\gamma = 0$ 时, 线阵 CCD 上接收到的干涉条纹的光强分布为

$$I = I_0 (1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta) = I_0 [1 + \cos(\omega y + \varphi)], \quad (2)$$

其中
$$\omega = \frac{4\pi W\theta}{R\lambda}, \quad \varphi = \frac{4\pi e}{\lambda} + \pi, \quad (3)$$

从(2)式可见, 线阵 CCD 上所接收到的光强分布为其像元序号 y 的余弦函数, 由(2)式可得干涉条纹光强取极大值条件

$$\omega y + \varphi = 2x\pi, \quad (4)$$

其中 x (取整数) 为光强极大值序号。把(3)式代入(4)式整理得

$$y = kx + a, \quad (5)$$

其中
$$k = \frac{R\lambda}{2W\theta}. \quad (6)$$

现保持空气劈尖的劈尖角 θ 不变, 在两块光学平板玻璃 M_1 和 M_2 之间注入折射率为 n 的待测液体, 则(5)式相应变成 $y = k'x + b$, 其中

$$k' = \frac{R\lambda}{2nW\theta}, \quad (7)$$

由(6), (7)两式可得待测液体折射率

$$n = k/k', \quad (8)$$

由此可见, 利用(5)式 y 和 x 之间的线性关系, 只要先后对 M_1 和 M_2 之间为空气薄膜与水薄膜两种情形下 y 和 x 的测量数据分别进行一元线性回归处理, 再把得到的回归系数代入(8)式, 即可求得待测液体折射率 n 。

3 图像的分析与采集

3.1 背景光的影响

设图 2 中组成空气劈尖的两块光学平板玻璃

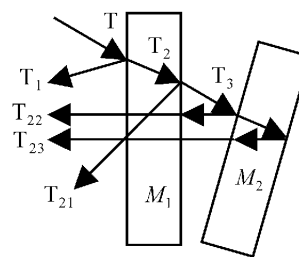


图 2 光强分析图

Fig. 2 Sketch of intensity analysis

M_1 和 M_2 的折射率均为 1.55, 空气的折射率为 1, 下面就以水为待测液体对背景光的影响进行分析。

设水的折射率为 1.33, 则由菲涅耳公式可得, 光在平板玻璃 M_1 上垂直入射时, 光在空气与玻璃

的分界面上振幅反射比 $r_1 = 0.216$, 光在水与玻璃的分界面上振幅反射比 $r_2 = 0.0764$; 另外, 光在图 2 中依次通过各分界面的振幅透射比如表 1 所示, 其中 t 与 t' 分别表示光向右、向左的振幅透射比。

表 1 振幅透射比

Table 1 Transmission ratio of swing

Light spread direction	Front surface of M_1	Back surface of M_1		Front surface of M_2	
		Air film	Water film	Air film	Water film
Rightward	$t = 0.784$	$t_{11} = 1.216$	$t_{12} = 1.0764$	$t_{21} = 0.784$	$t_{22} = 0.924$
Leftward	$t' = 1.216$	$t'_{11} = 0.784$	$t'_{12} = 0.924$	$t'_{21} = 1.216$	$t'_{22} = 1.0764$

设图 2 中入射光 T 的振幅为 1, 则它在 M_1 前表面上形成的反射光(背景光之一) T_1 振幅 $A_{01} = r_1$, 当 M_1 和 M_2 之间为空气薄膜时, T 的折射光 T_2 经 M_1 后表面反射形成的光 T_{21} 的振幅 $A_1 = t'r_1$, T_2 的折射光 T_3 再经 M_2 前表面反射形成的光 T_{22} 振幅 $A_2 = t'r_1 t_{11} t'_{11}$, T_3 的折射光再经 M_2 后表面反射形成的光(背景光之二) T_{23} 振幅 $A_{02} = t'r_1 t_{11} t_{21} t'_{11} t'_{21}$; 当 M_1 和 M_2 之间为水薄膜时, 光 T_{21} 的振幅 $A'_1 = t t' r_2$, 光 T_{22} 振幅 $A'_2 = t' r_2 t_{12} t'_{12}$, T_{23} 振幅 $A'_{02} = t' r_1 t_{12} t_{22} t'_{12} t'_{22}$ 。通过计算可得背景光的总光强为

$$I_0 = I_{01} + I_{02} = (A_{01})^2 + (A_{02})^2 = 0.0467 + 0.0352 = 0.0819,$$

而 M_1 和 M_2 之间的薄膜分别为空气和水时, 两束相干光 T_{21} 和 T_{22} 干涉加强所形成的光强极大值分别为: $I_{\max} = (A_1 + A_2)^2 = 0.161$; $I'_{\max} = (A'_1 + A'_2)^2 = 0.0211$ 。

光强计算结果表明, 由于背景光较强, 将严重影响干涉图像质量, 尤其是在 M_1 和 M_2 之间为水薄膜时, 干涉条纹完全被背景光所淹没, 这给干涉图像的视频观察和采集带来很大困难, 所以, 背景光的消除是实验成功的关键。背景光强 I_0 的消除方法是在对干涉图像进行采集之前, 先通过 CCD 采集光学平板玻璃 M_1 单独存在时, 其前后两个表面的总反射光强 I'_0 ($I'_0 = (A_{01})^2 + (A_1)^2 = 0.0893$), 并将其保存在存储器 1 中, 然后把 CCD 采集到的干涉图像光强分布保存在存储器 2 中, 再把二者相减的结果保存在存储器 3 中。由于光强 I'_0 与用 CCD 采集干涉图像时的背景光强 I_0 相当, 则存储器 3 中保存的光强分布信息基本消除了背景光强的影响。

3.2 噪声的影响

由于 CCD 上接收到的干涉条纹, 受到来自 CCD 器件自身及其输出电路的噪声、光源的不稳定

性以及实验系统振动等其他一些随机因素带来的干扰, 使 CCD 的输出信号含有严重的高频噪声, 为提高信号质量, 减少噪声影响, 根据 CCD 信号特点在硬件电路上采用四阶巴特沃思数字低通滤波器对原始信号进行处理, 并在保证信号不失真的前提下, 尽可能降低截止频率, 以便有效消除高频干扰。

3.3 图像信息的处理

经过对 CCD 信号的有效滤波和快速采集, 为了由(5)式确定回归系数, 系统需能自动识别出 CCD 上接收到的干涉图样中光强极大值点的序号 x , 并能准确确定每个极大值点对应的 CCD 像元序号 y 。为此, 系统首先采用中值滤波对信号做平滑处理, 以保证局部范围内信号的平滑。然后, 运用最小二乘法对局部范围内的原始数据进行拟合, 从而得到一条光滑的曲线, 并沿曲线逐点计算其斜率。当斜率由正变负时, 其间有极大值; 当斜率由负变正时, 其间有极小值。在进行软件编程时, 以变量标记斜率, 当斜率发生正负变化时, 确定该极大值的位置序号 x 并记录相应的 CCD 像元序号 y 。

4 测量步骤

按图 1 把装置大致安装好, 再对系统作如下调节:

1) 空气劈尖调节: 从公式(1)~(4)的推导过程可知, 应用公式(8)计算待测液体折射率 n 的前提条件是: 空气劈尖表面上的光线必须垂直入射。为此, 在具体测量之前, 需要先对空气劈尖进行调节^[12]。

2) 通过 CCD 图像采集与处理系统对只有 M_1 存在时, 对其前后两个表面的总反射光强 I'_0 进行采集, 并将其保存在存储器 1 中。

3) 安置平板玻璃 M_2 形成空气劈尖, 并通过对控制 M_2 倾斜度装置的精密调节, 直到从视频监控

器观察到间距大小适中的干涉条纹。

4) 通过 CCD 对干涉图像进行采集, 并将其保存在存储器 2 中, 再把两个存储器相减的结果保存在存储器 3 中, 对由存储器 3 中数据处理所得的 y 和 x 进行回归处理, 计算出 k 值。

5) 保持劈尖的劈尖角 θ 不变, 在 M_1 和 M_2 之间注入待测液体, 重复过程 4), 计算出 k' 值和待测液体 n 。

5 结果及误差分析

利用上述方法对蒸馏水的折射率进行测量, 所用线阵 CCD 的有效光敏元为 2048 位, 相邻二个光敏元中心的间距 W 为 $14 \mu\text{m}$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。实验测量数据及二乘拟合曲线如图 3 所示。

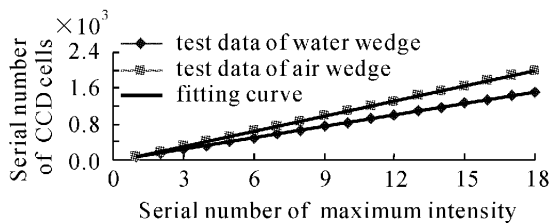


图 3 数据回归曲线

Fig. 3 Regression curves of test data

当 M_1 和 M_2 之间分别为空气薄膜与水薄膜时, y 和 x 间的拟合曲线方程分别为

$$y_1 = 113.96904x - 48.37255,$$

$$y_2 = 85.51084x - 25.57516.$$

由 $k = 113.96904$, $k' = 85.51084$ 代入(8)式计算得待测液体折射率 $n = 1.3328$ 。由公式(8)可得, 测量结果的相对误差 $(\Delta n/n) = [(\Delta k/k)^2 + (\Delta k'/k')^2]^{1/2} = 0.09\%$, 最后结果为 $n = 1.3328 \pm 0.0012$ 。

在实验之前, 只要按测量步骤 1) 所述的方法进行调节, 能够较容易地保证入射角 γ 不超过 0.1° , 其余弦值与作为垂直入射时相比, 引起的相对误差为 10^{-4} 量级, 因而光线在空气劈尖表面垂直入射的调节误差忽略不计; 另外, 新的折射率测量方法还受到条纹有局部弯曲, CCD 光电响应的非线性和非均匀性, 光源频率变化等这几个因素所带来的误差影响, 为了更进一步提高系统的测量精度, 可采取以下措施: 1) 选用平面度误差较小的高精度平晶, 取代实验中组成空气劈尖的两块光学平板玻璃 M_1 和 M_2 , 并在测量过程中保持两者间的清洁和液体层中没有气泡; 2) 通过选择像元尺寸小, 而像元总数多的优

质 CCD 和图像板来探测干涉条纹, 以提高公式(5)中系数 k 的测量精度; 3) 采用稳频激光器作光源, 并对干涉条纹多次重复采样取平均后, 再提取条纹信息进行后续处理。

6 结 论

基于薄膜的等厚干涉原理与 CCD 图像处理技术的结合, 提出了用于测量透明液体折射率的新方法。测量结果表明, 新的测量方法是可行的, 测量结果的相对误差为 0.09% 。由于测量系统具有光路调节简单、操作容易、自动化程度高, 影响测量结果因素少等特点, 是一种具有实际应用价值的液体折射率测量方法。另外, 介绍的消除背景光对采样图像影响的方法, 对其他光学实验中如何有效获得清晰、干净、高对比度的干涉条纹, 也具有一定的参考价值与指导意义。

参 考 文 献

- Wu Yingcai, Yuan Yifang. Research of a novel principle on sea-water salinity measurement based on refractive index change [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):199~202
吴英才, 袁一方. 基于折射率变化的一种新型盐度测量原理研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):199~202
- Luan Lan, Shan Hui, Ma Xiufan *et al.*. A deeper research on the experiment measuring the refractive index of thin glass plate with Michelson interferometer [J]. *College Physics*, 2000, **19**(11):20~23
栾兰, 闪辉, 马秀芳等. 迈克尔逊干涉仪测平行玻片折射率的进一步研究[J]. *大学物理*, 2000, **19**(11):20~23
- Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement by optical fiber Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9):1294~1296
李毛和, 张美敦. 用光纤迈克尔逊干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9):1294~1296
- Lei Hua, Lu Yang, Pan Qinmin. A novel method for measuring the refractive index of liquid [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(5):441~446
雷华, 鲁阳, 潘勤敏. 用干涉原理测定液体折射率的新方法[J]. *光学技术*, 2001, **27**(5):441~446
- Song Wei. Measuring index of refraction of transparent medium by separating gap method of laser single slit diffraction [J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(5):335~336
宋伟. 用激光单缝衍射分离间隙法测量透明介质折射率[J]. *应用激光*, 2001, **21**(5):335~336
- Wei Renxuan, Jiang Desheng. Refractive index measurement with Fabry-Perot interference wavelength [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):551~554
魏仁选, 姜德生. 基于 F-P 干涉波长的折射率测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):551~554
- Zeng Jie, Lian Dakai, Cao Zhenxin. Research on liquid refractive index measured by the prism surface plasmon wave sensor [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(2):97~99
曾捷, 梁大开, 曹振新. 棱镜型表面等离子体波传感器测量液体折射率的研究[J]. *应用激光*, 2003, **23**(2):97~99
- Wu Junlin, Yang Zongli, Yuan Shengli *et al.*. Light field circular

- blur effect on liquid surface and refraction index measurement [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(3):308~310
- 吴俊林,杨宗立,袁胜利等. 液体表面光场环状暗斑效应及折射率测量[J]. *光学技术*, 2004, **30**(3):308~310
- 9 Deng Guangan, Cai Zhigang, Zhang Yunhua *et al.*. Refraction index measurement of transparent materials by using diffraction grating and CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):99~103
- 邓广安,蔡志岗,张运华等. 用衍射光栅和 CCD 测量透明材料折射率[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1):99~103
- 10 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):67~71
- 张娜,冯霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):67~71
- 11 Qi Shengwen, Zhang Chunping, Zhang Lianshun *et al.*. Measurement of refractive index of liquid by interference of thin films [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(1):59~61
- 祁胜文,张春平,张连顺等. 利用楔形薄膜干涉测定液体的折射率[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(1):59~61
- 12 Hua Shiqun, Luo Ying. High precision measurement of alignment error based on theory of interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):76~80
- 花世群,骆英. 基于干涉原理的高精度直线度误差测量[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):76~80