

文章编号: 1002-1582(2005)05-0729-03

用光学方法测量液体的物理参数^{*}

杨宗立, 苗润才

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

摘 要: 实验发现, 激光束照射在振动的液面上, 表面波对入射光可产生衍射; 插入液体里的金属细丝被拉出液面时, 由于液体的润湿效应, 其周围的液体拉伸一定高度而断裂。以上两种实验现象机理, 可用于液体表面张力系数的测定。激光经小孔透射样品池中的液体介质, 在液体上表面发生遮光效应, 根据其机理, 建立了一种测量液体折射率的新方法。

关 键 词: 测量; 激光束; 表面张力系数; 折射率。

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

Optical measurement in physical parameter of liquid

YANG Zong-li, MIAO Run-cai

(College of Physics and Information Technology, Shanxi Normal University, Xian 710062, China)

Abstract: Experiments show that, when the laser light illuminates the vibrancy liquid surface, the surface wave may diffract the incident light. When a tinsel inserted in the liquid is drawn out, the liquid around the tinsel is drawn to a certain height and broken then by the humidification effect. The principles of the above experiments can be applied to measure the coefficient of tension for liquid surface. When laser light transmits through a pinhole in liquid, the light-stopping effect happens at the liquid surface. Based on the principle of this experiment a new method for measurement of liquid refractive index was built.

Key words: measurement; laser beam; surface tension; refractive index

1 引 言

用激光作为信息载体研究液体的物理参数, 是在液体表面静态、动态及各种环境下对表面实施无损、实时、智能化的检测手段。光学测量已广泛应用于许多领域, 60 年代末期, 由于激光技术的广泛应用, 国际上开始了表面声波的可视化研究^[1], 在很短时间内, 无论是从研究对象还是研究方法上都有了很大的进展^[2,3]。随着超短激光脉冲技术的发展, 当介质表面在光脉冲的激发下所产生的表面等离子波同样可以产生表面声波, 由光波所产生的声波同样可以用到超快过程的诊断^[4,5]。最近国外有人采用正弦振幅调制型光束照射, 实现表面声波的可视化研究^[6], 这种方法具有全光学、实时、全场等重要特性。

在实验中, 我们就液体表面声波对入射光波的衍射进行了研究, 并提出将这种方法用于研究表面相变、表面张力等物理特性^[7,8]。在实验过程中发现: 当用扩束后的激光束入射在包括插在液体中金

属细丝的较大区域上时, 其反射光场分布为周围明亮的光场包围中心暗场, 且暗场形状近似为椭圆形^[9]。插入液体里的金属细丝拉出液面时, 由于液体的润湿效应, 将带动金属细丝周围的液体拉伸一定高度而断裂, 利用计算机图像处理系统可计算出液面拉伸高度, 且椭圆长轴和短轴大小与液体和金属细丝润湿接触角有关, 进而可用接触角求出液体表面张力系数^[10,11]。在研究液体表面诊断技术时, 首次发现了激光透过液体样品的光场中出现了一个环状暗斑——遮光效应^[12], 分析遮光半径与液体折射率之间的关系, 建立了一种智能化测量液体折射率的新方法。

2 基本原理

2.1 表面波及其色散关系

激光束照射在振动的液体表面上, 若只考虑重力和液体的表面张力作用, 可建立一个简单的直波模型, 得到表面张力波的色散关系

$$\omega^3 = gk + \alpha k^3 / \rho \quad (1)$$

* 收稿日期: 2004-09-15; 收到修改稿日期: 2004-10-26

E-mail: yangzongli5701@yahoo.com.cn

基金项目: 教育部重点基金项目(02068); 陕西师范大学重点科研项目。

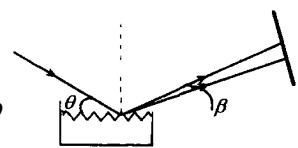
作者简介: 杨宗立(1957-), 男, 陕西人, 陕西师范大学高级实验师, 从事光声技术研究。

因振动液面的振动频率较低,因此可忽略重力作用,色散关系近似为

$$\omega^3 = \alpha k^3 / \rho \quad (2)$$

其中 ω 为液面振动频率;
 α 为液体表面张力系数;
 k 为表面波的波矢量; ρ 为液体密度; g 为重力加速度。

图 1 表面波实验原理图



波矢量 k 值可用下式求得^[13]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \frac{\beta}{2} \left[\sin \left(\theta + \frac{\beta}{2} \right) + \sin \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (3)$$

其中 λ 为激光波长; θ 为入射角; β 为一级衍射角。实验原理如图 1 所示。

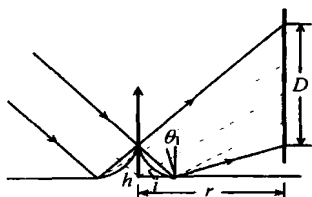
2.2 弯曲表面上光的临界反射及其色散关系

扩束后的激光束入射在插有金属细丝的较大区域液面上,由于液体的润湿效应,在细丝周围的液体会产生区域弯曲现象。观察其临界反射后的反射场为明亮光场包围中心暗场,暗场形状近似为椭圆形,其短轴为观察屏上暗区的宽度,用几何光学可推导出它与液面上升高度之间的关系

$$D = \frac{4}{\cos^2 i} r 4 \theta_1 + 2 h \quad (4)$$

其中 D 为暗区宽度; i 为掠射角; r 为观察屏距金属细丝的距离; h 为液面上升高度; θ_1 为液面法线与水平法线之间的夹角。实验原理如图 2 所示(理论分析见参考文献^[10])。

图 2 临界反射示意图



θ_1 值可用下述方法求得:测量两次金属细丝距观察屏上暗区的宽度 D_1 和 D_2 ,测出两次观察屏之距 r_1 , θ_1 值即为

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left| \frac{D_2 - D_1}{r_1} \right| \cos^2 i \quad (5)$$

而液面上升高度与液体表面张力系数之间满足^[10]

$$h^2 = \frac{2\alpha}{\rho g} (1 - \sin \theta_1) \quad (6)$$

2.3 遮光效应与其色散关系

在样品池底部放置一遮光板,遮光板中央有一针孔。当激光器发出的光通过遮光板上的针孔时,经样品池底部散射,然后透过样品池中的液体样品,在液体样品的上表面发生遮光效应。由于在该界面上光是由光密介质到光疏介质,当入射角超过一定值时,将发生全反射现象。根据全反射原理,则临界

角 θ_c 满足^[12]

$$\sin \theta_c = n_0 / n \quad (7)$$

式中 n_0 和 n 分别为界面上下介质的折射率。

在入射角小于临界角的范围内,将有光透过液体介质的上表面,这部分透射光就形成了遮光效应中的中心亮斑(图 6)。由于样品池底面是一散射面,这部分光经散射后在视场中形成外围的亮区,在液体介质上方观察,中心亮斑到外围亮区之间形成了一个暗环。若暗环半径为遮光半径 r ,则 r 满足

$$\sin \theta_c = r [2 \sqrt{h^2 + (r/2)^2}]^{-1} \quad (8)$$

式中 h 为液体介质的厚度。根据(7)、(8)式,得到遮光半径 r 与介质折射率 n 关系为

$$r^2 = \frac{4 h^2 n_0^2}{n^2 - n_0^2} \quad (9)$$

在实际测量中,可采用比较法。即选择标准样品,通过比较标准样品和待测样品的遮光半径,求出待测样品与标准样品折射率的相对值。待测样品折射率的表达式即为

$$n^2 = n_0^2 + (r_s / r)^2 (n_s^2 - n_0^2) \quad (10)$$

式中 n 、 n_s 、 n_0 分别为待测样品、标准样品和空气的折射率; r_s 、 r 分别为标准和待测样品的遮光半径。

3 实验与实验结果

3.1 液体表面波及其衍射光栅

由低频信号发生器驱动一插在液体中的线状传感器,打开电源,液面发生振动。液面的振动频率即为信号发生器输出频率。用 He-Ne 激光器的光束照射振动液面(实验装置如图 3 所示),经液面反射后可在观察屏上看到清晰的衍射光栅,衍射图样如图 4 所示。

衍射级次与振源信号的强弱有关,振源信号越强,液体表面波振动就越强,则衍射级次越多,衍射效应越大,衍射效率越高(实验测量最大在 85 % 以上)。另外,

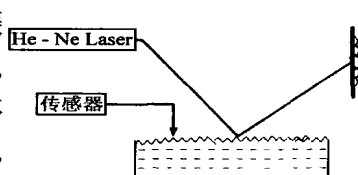


图 3 表面波实验装置图

衍射级次也随振源频率变化,从实验中观察到:对水表面共振曲线在振动频率为 220 Hz 和 316 Hz 处个有一个峰值。

从实验现象(图 4)发

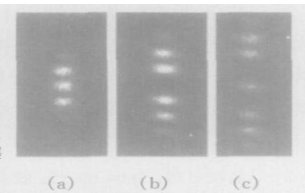


图 4 衍射图样

现:图4(a)中,二阶光强度不能忽略;图4(b)、(c)中,并不是衍射级次越高,光强度越小这样一种简单关系,图4(b)中零级消失,图4(c)中一级消失。因此,作为完整的体系,不能忽略高阶衍射和衍射光强与声波的非线性关系问题。

不同的液体表面,衍射图样的衍射角不同。移动入射光距振源的位置,可测得相应点的波矢量和衍射角。振源频率 220Hz,水温 14.5℃,对纯水进行多次测量,把相应实验值代入式(2)中,计算出纯水的表面张力系数为 $(70.71 \pm 0.15) \times 10^{-5} \text{N/cm}$ 。

3.2 弯曲表面上的临界反射

实验中用液体表面作为反射面,液体表面既是理想的水平面。当用扩束后的激光束入射在液面上,反射光在观察屏上呈现为均匀亮场。现在液体表面插入一金属细丝,由于液体的润湿效应而在细丝周围的液体将发生区域弯曲。当再将扩束后的激光束照射此弯曲液面上,则其反射场在观察屏上呈现为明亮的亮场包围边界清晰的暗场。实验原理如图5所示,结果如图6所示。

实验中用细铜丝插入纯水和煤油的表面,两个区域弯曲表面激光照射后形成临界反射^[10],图样形状相同(近似为椭圆形),但测量其图形长、短轴的大小有别,纯水图形的短轴相对煤油图形较长,而纯水图形的长轴相对煤油图形较短。

另外,实验中用不同材料的细丝插入同一液体引起的暗场大小也不相同(湿润效应有别)。

用上述方法,根据公式(4)、(5)测得铜和铝细丝引起纯水区域弯曲高度分别为 0.160cm 和 0.135cm,测得铜和铝与纯水的湿润接触角分别为 54.79° 和 61.41°,利用公式(6)和测得的实验数据,经多次测量计算出纯水在 20℃时的表面张力系数为 $(71.62 \pm 0.23) \times 10^{-5} \text{N/cm}$ 。

3.3 遮光效应

在样品池底部放置一遮光板,遮光板中央有一针孔。其底部为毛玻璃状的散射体,样品池可用培养皿状的物品,当激光器发出的光通过遮光板上的针孔时,经样品池底部散射,然后透过样品池中的液

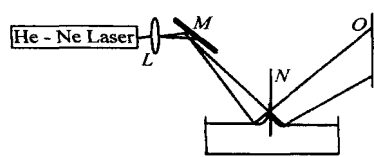


图5 临界反射装置图

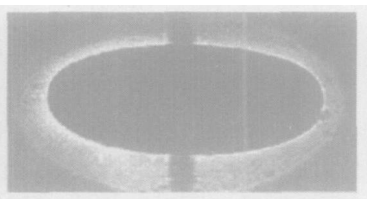


图6 临界反射结果图

体样品,在液体样品的上表面发生遮光效应。在样品池正上方用 CCD 接收液体上面的遮光图像,将采集到的图像数据直接输入计算机,按编制的处理软件处理数据,实验装置如图7所示,CCD 检测到的液体表面遮光图像如图8所示。

遮光图样为中心对称图像,中心是一个亮斑,亮斑周围是一暗环,暗环周围又是一亮场。液体表面对透过液体的光波产生了遮光作用^[12],遮光的效果使光场中出现了暗环。可定义暗环的外半径为遮光半径。

实验中对纯水和 CS₂ 的遮光图像分析发现:对同样厚度纯水的遮光半径大于 CS₂ 的遮光半径;对于同一种液体样品,样品池中液体的厚度越厚,则遮光半径就越大。

实验中,以纯水作为标准样品,CS₂ 为待测样品。室温在 20℃,分别将相同体积的纯水和 CS₂ 依次装入样品池内。用 CCD 在同等条件下分别检测纯水和 CS₂ 遮光图像,在计算机上比较并测量出标准样品和待测样品的遮光半径,根据(10)式可计算出待测样品的折射率。纯水的折射率 $n_d = 1.333$,空气的折射率 $n_0 = 1$,当液体样品厚度 0.4cm 时,纯水和 CS₂ 遮光半径分别为 51 个像素和 36 个像素,计算出 CS₂ 液体的折射率为 1.6196。这一实验值与理论值(1.6255)非常接近。

4 结 论

(1) 表面波对激光可形成衍射光栅。振源频率为液面振动频率,改变振源频率可改变光栅常数,从而得到实时可调光栅。

(2) 利用液体表面波的光栅衍射效应,可应用于液体表面张力系数的测定。

(3) 扩束后的激光束照射在插有金属细丝的弯曲液面较大区域上,临界反射后的反射场中心为暗场,暗场由明亮的亮场包围,暗场近似为椭圆形。

(4) 根据液面上升高度与暗场宽度的解析关系,得到了液面上升高度与液体润湿接触角和液体表面张力系数的色散关系。

(下转第 735 页)

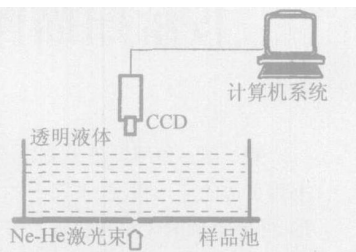


图7 遮光效应实验装置

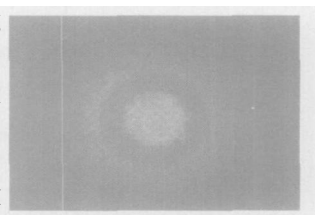


图8 CCD 检测的遮光图像

OCR 软件总是不能正确识别小数点,若某页小数点较多,则该页无畸变错误字符较多。对这些在没有畸变时也不能正确识别的字符,在计算纠错率时必须排除。

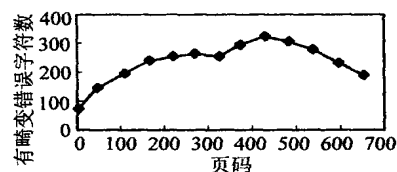


图5 有畸变错误字符数与页码的关系

图5是有畸变图像各页在7个分辨率下有畸变错误字符数的平均值。有畸变错误字符数是将畸变图像的实际错误字符数减去无畸变错误字符数得到的,它和页码有明显关系。随着页码的增加,产生畸变的部分越来越宽,错误字符数就越来越多。但到后面,错误字符数又逐渐变少。

图6是各分辨率下13页的平均纠错率。求纠错率需先求校正后错误字符数,它等于校正图

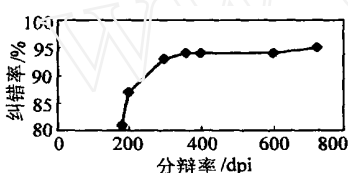
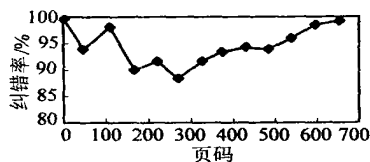


图6 纠错率与分辨率的关系

像的实际错误字符数减去无畸变错误字符数,但结果须不小于零(因个别情况下校正图像的实际错误字符反而更少)。然后将有畸变错误字符数与校正后错误字符数之差作为纠错字符数。这才能真正体现校正效果。纠错率是将纠错字符数除以有畸变错误字符数,并用百分数表示。可见和分辨率有明显关系。

根据图4、6可得出结论,实际扫描时不应选200(含200)dpi以下的分辨率。而由实验数据,分辨率为300、360、400、600和700dpi时,扫描时间分别为39、58、58、58和179s,灰度图像文件大小分别

为3.86、5.56、6.87、15.44和22.22MB。因此,实际扫描时也不应选720(含720)



dpi以上的分辨率。若只考虑300、360、400和600dpi时的数据,各页的平均纠错率如图7所示,最高为99.6%,最低为88.4%,其基本趋势是,页面越弯曲,畸变部分像素数越少,纠错率越低,而这13页总的平均纠错率为94.5%。

6 结论

利用设备无关显示技术使畸变模型描述参数可视化,实现对书籍扫描图像的校正,在OCR中可获得令人满意的校正效果,无需测量那些不断变化的畸变模型描述参数,提高了软件的可操作性。这对于提高办公自动化水平,降低操作人员劳动强度,都具有积极意义。

参考文献:

- [1] 钟晓刚,李新友,唐泽圣.书籍扫描图像的纠正[J].软件学报,2002,13(11):2116—2120.
- [2] 张全法,梁二军.平面物体在曲面状态下扫描仪图像的校正理论[J].光学技术,2003,29(3):337—340.
- [3] 张全法,冯小星,陈渝仁,梁二军.平面物体在曲面状态下扫描仪图像的校正实验[J].光学技术,2003,29(4):454—457.
- [4] 张全法,梁飞.设备无关显示软件的开发[J].郑州大学学报(理学版),2003,35(3):43—47.
- [5] 张宇铮,郭宝兰.TWAIN协议标准与图像输入[J].微机发展,1997,(5):37—40.
- [6] 刘珂昕,胡晓静.基于TWAIN标准的应用研究[J].计算机应用研究,2002,(2):145—147.
- [7] 谢志鹏,陈锻生.用VC设计数码相机、扫描仪的图像采集程序[J].微机发展,2002,(3):49—52.

(上接第731页)

(5) 遮光效应的遮光半径与介质本身以及介质在样品池中的厚度有关,主要与介质的折射率有关。当介质厚度一定时,折射率越大,遮光半径越小。

(6) 以上测量方法都是非接触的实验方法。具有无损、实时、方便灵活、智能化、设备低廉等优点。

参考文献:

- [1] Korpel A, Laub L J, Sievering H C. Measurement of acoustic surface wave propagation characteristics by reflected light[J]. Appl. Phys. Lett., 1967,(10): 295—298.
- [2] Stegeman G I. Optical probing of surface waves and surface wave devices[J]. IEEE Trans. Sonics Ultrason., 1976, SU-23: 33—63.
- [3] Monchal J P. Optical detection of ultrasound[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 1986, UFFC-33:485—499.
- [4] Barter J D, et al. Real-time wave-amplitude spectrum analyzer for air-liquid interface[J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 64: 1896—

1898.

- [5] Katayama K, Shen Q, Harata A, et al. Unusual enhancement of transient reflecting grating signal under a surface plasmon resonance condition[J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(17): 2468—2570.
- [6] Duncan B D. Visualization of surface acoustic waves by means of synchronous amplitude-modulated illumination[J]. Appl. Optics, 2000, 39(17): 2888—2895.
- [7] 苗润才,杨宗立.液体表面波物理特性及其光学效应的研究[J].物理学报,1996,45(9):1521—1525.
- [8] Miao R C, Yang Z L, Zhu J T. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction[J]. Applied physics letters, 2002, 80(17): 3033—3035.
- [9] 苗润才,杨宗立,等.局域弯曲液体表面反射光的黑洞效应[J].光子学报,1995,24(24):18—21.
- [10] 杨宗立,苗润才.弯曲表面上光的临界反射现象及其应用[J].光子学报,2000,29(4):327—329.
- [11] Miao R C, et al. Critical light reflection from curved liquid surface[J]. Optics Communications, 2003, 218:199—203.
- [12] 苗润才,朱京涛,杨宗立.液体表面的遮光效应及其应用[J].光子学报,2002,31(4):489—491.
- [13] Weisbuch G, Garbay F. Light scattering by surface waves[J]. 1979, 47(4): 355—356.