

文章编号: 1001-3806(2007)05-0537-03

## 激光衍射法测量液体薄膜厚度的研究

苗润才<sup>1,2</sup>, 朱峰<sup>1,3</sup>

(1. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062; 2. 榆林学院 物理系, 榆林 719000; 3. 西安通信学院 基础部, 西安 710106)

摘要: 为了测量厚度小于 0.5mm 不溶性液体薄膜的厚度, 采用激光衍射法验证了液体薄膜的色散关系, 并根据其机理, 建立起一种实时、非接触的测量不溶性液体薄膜厚度的方法, 测得了薄膜的厚度。结果表明, 实验值与理论十分吻合。

关键词: 衍射光栅; 液体薄膜; 色散关系; 表面波

中图分类号: O348.11 文献标识码: A

### Study on thickness measurement for liquid film by means of laser diffraction

MIAO Run-cai<sup>1,2</sup>, ZHU Feng<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. Department of Physics, Yulin College, Yulin 719000, China; 3. Department of Mathematics and Physics, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)

**Abstract** An experimental setup was constructed to measure the thickness less than 0.5mm of the indissoluble liquid film. When the laser falls on the liquid film surface waves, steady and visible diffraction patterns were obtained. Based on laser diffraction, the theory of dispersion relations for waves on liquid film surfaces was testified. Subsequently, the thickness of the liquid film was measured carefully. The result shows that the measured thickness corresponded with the actual thickness very well. Based on the principle of this experiment, a new method for thickness measurement of indissoluble liquid film is built in a real time and non-contact way.

**Key words** diffraction gratings; liquid film; dispersion relations; surface waves

### 引 言

液体表面波特性的分析可以有效地探测液体表面的物理性质, 在流体力学、海洋学、雷达探测等方面已有广泛应用<sup>[1-5]</sup>。早在 1979 年, WEISBUCH 等人首次实现了液体表面波的光栅衍射, 并以此建立了表面张力的光学测量方法<sup>[6]</sup>。该方法不仅奠定了用光学方法研究液体表面波及表面物理性质的基础, 而且又可实现实时变频光栅<sup>[7-10]</sup>。虽然液体表面波的色散关系已有完善理论和应用<sup>[3,11]</sup>, 但是基于激光衍射方法研究液体薄膜的色散关系和液体薄膜厚度的测量几乎没有人考虑过<sup>[10,12]</sup>。本文中实现了激光在几百赫兹液体薄膜表面波上的衍射, 观察到稳定、清晰的衍射图样, 利用激光衍射法验证了液体薄膜的色散关系, 建立了一种实时、非接触的测量不溶性液体薄膜厚度的新方法。

### 1 实 验

#### 1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 它由 4 部分组成, 包括低频

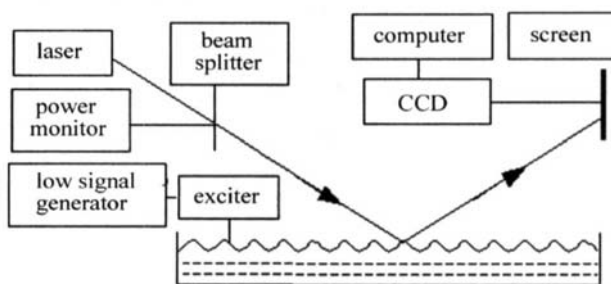


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

信号发生器及表面波激发器; 矩形水槽; 激光光源及光学系统; 数据采集和处理系统。低频信号发生器输出的信号驱动表面波激发器, 表面波激发器输出频率即为低频信号发生器输出的信号频率, 表面波激发器固定在三维可移动支架上, 可调节波源与入射光之间的距离及表面波的激发深度。HeNe 激光束 (波长 632.8nm) 经分光镜分为两束, 一束用来监控激光输出的稳定度, 另一束直接照射到薄膜表面波上。因为激光束斜入射到薄膜表面, 所以薄膜表面上入射光斑为一椭圆形, 长短

基金项目: 陕西省科技厅科技计划资助项目 (2003A-12)

作者简介: 苗润才 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事瞬态光学和声光技术研究。

E-mail: rmia@snnu.edu.cn

收稿日期: 2006-07-26 收到修改稿日期: 2006-11-07

轴分别为 28mm 和 2.4mm, 长轴与表面波传播方向平行。实验中, 水槽放在一个可调节位置的金属板上, 表面波发生器固定在一个可以调节位置的支架上, 这样可以改变振源与光入射点间的距离。由于薄膜表面上存在表面波, 入射的光束发生衍射效应, 在观察屏上可观察到清晰的衍射图样, 用 CCD 采集衍射图样, 并将数据直接输入计算机。在计算机上可以显示、储存、处理衍射图样, 经计算机扫描后求出衍射光斑的距离。CCD 的大小为 7.95mm × 6.45mm, 信噪比超过 48dB。

## 1.2 实验原理

实验原理如图 2 所示。虽然实际液体表面粒子运

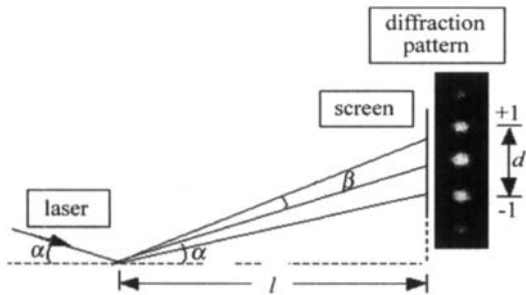


Fig 2 Principle of light diffraction from surface wave

动较为复杂, 但通常可把这种运动近似为正弦波。因此, 表面波波函数可写为  $z = A \cos(\omega t - kx)$ , 这里  $z$  为纵向坐标,  $x$  为波传播方向的坐标,  $A$  为振幅,  $\omega$  为角频率,  $k$  为波数。激发器激发表面波, 从 He-Ne 激光器发出的激光以一定掠射角  $\alpha$  (本实验中掠射角为 0.0909rad) 入射在薄膜表面波上。薄膜表面波为正弦位相型反射光栅, 薄膜表面波波长  $\lambda$  的大小相当于传统透射光栅的光栅常数大小<sup>[8,9]</sup>。入射的激光经波面反射后在远场叠加, 出现衍射图样。一个波面上任意一点的反射光束与相邻波面上相应点的反射光束有相同的反射方向, 因为这两点对应波的斜率相同, 所以两束反射光以相同方向传播。由于光速远大于薄膜表面波的波速, 且表面波的衰减较小, 则在计算两束光的光程差时可认为波形无变化。

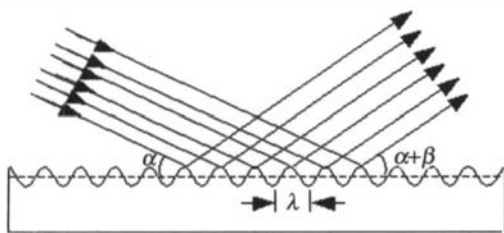


Fig 3 The light path lengths from surface wave

通过对图 3 的分析,  $\pm 1$  级衍射亮斑满足的条件为:

$$\lambda \cos \alpha - \lambda \cos(\alpha + \beta) = \lambda' \quad (1)$$

$$\lambda \cos \alpha - \lambda \cos(\alpha - \beta) = -\lambda' \quad (2)$$

由 (1) 式、(2) 式得:

$$\lambda \sin \alpha \sin \beta = \lambda' \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为薄膜表面波的波长,  $\alpha$  为掠射角,  $\sin \alpha = h / \sqrt{h^2 + l^2}$ ,  $\beta$  为中央亮斑与第 1 级亮斑的角宽度,  $\sin \beta = d / (2 \sqrt{h^2 + l^2})$ , 其中  $d$  为  $\pm 1$  级衍射亮斑间距,  $h$  为中央亮斑到液面的垂直距离,  $h = 62.15 \text{ cm}$ ,  $l$  为入射光点与观察屏之间的距离,  $l = 681.82 \text{ cm}$ ,  $\lambda'$  为激光波长。几百赫兹的薄膜表面波, 其振幅在微米数量级, 波长在毫米数量级<sup>[7]</sup>, 由于几百赫兹薄膜表面波的波长远大于入射光的波长, 因此, 为了得到较大的角宽度  $\beta$ , 掠射角  $\alpha$  应尽量小一些。薄膜表面波的波长  $\lambda$  和波数  $k$  的关系为  $k = 2\pi / \lambda$  因此通过测量  $\pm 1$  级衍射亮斑间距, 利用 (3) 式可得薄膜表面波的波数  $k$ 。

## 2 实验结果与分析

设有一层不溶性液体在另一层液体上均匀展开, 下层液体密度和深度为  $\rho$  和  $h$ , 上层液体与下层液体的界面张力为  $\alpha$ , 上层液体薄膜的密度和厚度为  $\rho'$  和  $h'$ , 并且  $\rho' \ll \rho$ ,  $h \ll h'$ , 表面张力为  $\alpha'$ 。液体薄膜的色散关系<sup>[10,11]</sup>:

$$\omega^2 = \frac{E + \sqrt{G}}{2F} \quad (2)$$

式中,  $E = r\omega_1^2 + \omega_1^2 \tanh(kh') + \omega_2^2$ ,  $F = 1 + r \tanh(kh')$ ,  $G = E^2 - 4F\omega_1^2\omega_2^2 \tanh(kh')$ ,  $r = \rho' / \rho$ ,  $\omega_1^2 = \alpha' k^3 / \rho'$  和  $\omega_2^2 = \alpha k^3 / \rho$

实验温度 25°C, 上层薄膜分别选用煤油、苯和二甲苯, 下层液体为蒸馏水, 上层 3 种液体都不溶于水, 密度比水小, 在蒸馏水上可形成不溶性液体薄膜。水槽为矩形, 横截面积 936cm<sup>2</sup>, 水深近 20mm, 不溶性液体通过医用注射器加入水槽, 在蒸馏水上均匀展开形成薄膜。薄膜厚度为加入水槽不溶性液体的体积除以水槽横截面面积, 因此, 通过调整医用注射器加入水槽不溶性液体的体积, 可实现薄膜厚度的变化。实验中先加一定厚度的不溶性液体, 待液体扩展均匀后, 激发表面波测量; 然后改变薄膜厚度, 再激发表面波测量。由于上述 3 种液体都有一定的挥发性, 所以, 实验应迅速完成, 尽量避免由于液体的挥发而引起实验误差。下面分两种情况来验证液体薄膜的色散关系。

### 2.1 薄膜厚度不变, 频率和波数的关系

当蒸馏水中薄膜的厚度为 0.1603mm 时, 调整表面波的频率从 80Hz ~ 240Hz 以 20Hz 间隔增加, 通过激光衍射法测量出不同频率下表面波的波数  $k$ 。以蒸馏水中加入煤油为例, 25°C 时煤油的表面张力 28mN/m, 煤油与蒸馏水的界面张力 36.5mN/m, 煤油密度 800kg/m<sup>3</sup>, 蒸馏水密度 1000kg/m<sup>3</sup>。薄膜色散关系的理论曲线与实验数据如图 4 所示, 二者基本吻合。

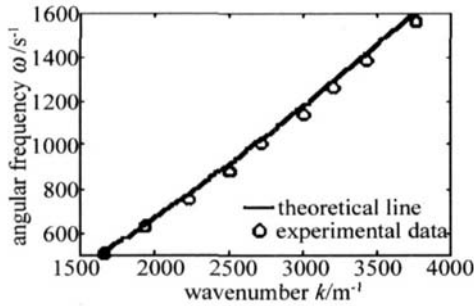


Fig 4 Theoretical plot and experimental data points of angular frequency  $\omega$  vs wavenumber  $k$  at film thickness 0.1603mm

## 2.2 表面波频率不变, 波数和薄膜厚度的关系

当表面波频率取 220Hz 时, 在蒸馏水中加入不同厚度薄膜, 加入不溶性液体的体积从 2.5mL 至 50mL, 以 2.5mL 间隔增加, 通过激光衍射法测量出不同厚度下表面波的波数  $k$ , 同样以蒸馏水中加入煤油为例。薄膜色散关系的理论曲线与实验数据如图 5 所示, 二者基本吻合。

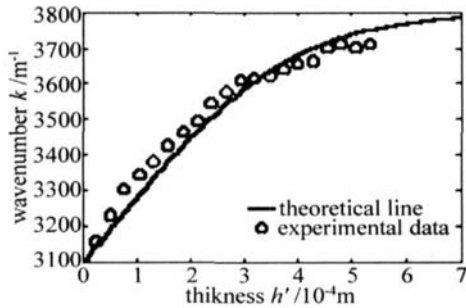


Fig 5 Theoretical plot and experimental data points of wavenumber  $k$  vs film thickness  $h'$  at frequency 220Hz

上述两种情况下, 实验数据与理论曲线基本吻合, 说明液体薄膜的色散关系正确。当选用苯和二甲苯为液体薄膜, 得到的结论与选用煤油相同。实验数据与理论曲线偏差的原因是液体薄膜厚度不均匀、薄膜在液体上的漂移或者薄膜的挥发性引起薄膜厚度的变化, 通过改善实验技术和减少测量时间, 可减小实验误差。

如图 5 所示, 当表面波频率不变, 液体薄膜厚度小于 0.5mm 时, 液体薄膜表面波的波数随薄膜厚度的增加而增加; 当薄膜厚度大于 0.5mm 时, 表面波的波数几乎不随薄膜厚度的变化。所以针对厚度小于 0.5mm 的薄膜, 当表面波频率保持不变时, 通过测量  $\pm 1$  级激光衍射光斑的间距, 计算出液体薄膜表面波的波数, 进而利用液体薄膜的色散关系可得液体薄膜的厚度。

## 3 结论

实现了频率为几百赫兹的液体薄膜表面波的激光衍射, 观察到了清晰的衍射图样, 衍射效率及反衬度都非常高。分两种情况验证液体薄膜的色散关系, 当薄膜表面波的角频率保持不变时, 波数和薄膜厚度的关系; 当薄膜厚度保持不变时, 角频率和波数的关系, 两种情况下薄膜色散关系正确。针对厚度小于 0.5mm 的液体薄膜, 提出了激光衍射法测量不溶性液体薄膜厚度的方法, 该方法具有实时、准确、无损和非接触的特点, 无论被测液体透明或不透明, 这一方法都适用。

## 参考文献

- [1] BARTER J D. Surface strain modulation of insoluble surface film properties [J]. *Phys Fluids* 1994, 6(8): 2606~2616
- [2] XU B Q, SHEN Zh H, NIX W *et al*. Time frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating-substrate systems [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 609~612 (in Chinese).
- [3] MAO R C, YANG Z L. Physical properties of liquid surface wave and its optical diffraction [J]. *Acta Physica Sinica* 1996, 45(9): 1521~1525 (in Chinese).
- [4] BARTER J D, LEE P H Y. Imaging surface wave analyzer for liquid surfaces [J]. *Appl Opt* 1997, 36(12): 2630~2635.
- [5] WANG J J, SHEN Zh H, NIX W *et al*. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the transparent coating-substrate system [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 177~180 (in Chinese).
- [6] WEISBUCH G, GARBAY F. Light scattering by surface tension waves [J]. *American Journal of Physics* 1979, 47(4): 355~356
- [7] YANG Y Z. The physical properties of liquid surface wave grating [J]. *Acta Optica Sinica* 1990, 10(2): 183~188 (in Chinese).
- [8] MAO R C, YANG Z L, ZHU J T *et al*. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction [J]. *A P L*, 2002, 80(17): 3033~3035
- [9] BARK T K, ROY A, KAR S A. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves [J]. *American Journal of Physics* 2005, 73(8): 725~729
- [10] MAO R C, ZHAO X F, SHI J M. Modulated interference of reflected light from a liquid surface wave at tens hertz frequencies [J]. *Opt Commun*, 2006, 259: 592~597.
- [11] KLEMENS P G. Dispersion relations for waves on liquid surfaces [J]. *American Journal of Physics* 1984, 52(5): 451~452
- [12] BARK T K, CHAUDHURI P R, ROY A *et al*. Probing liquid surface waves: liquid properties and liquid films with light diffraction [J]. *Meas Sci Technol* 2006, 17(6): 1553~1562
- [13] ЛАНДАУ Л Д, ЛИФШИЦ Е М. Fluid mechanics [M]. Beijing Higher Education Press, 1983, 48~49 (in Chinese).
- [7] JIAO J K, WANG X B, LU H. Analysis of temperature field and thermal stress field in quartz glass heated by laser beams [J]. *Laser Technology* 2007, 31(4): 427~430 (in Chinese).
- [8] TIAN W X, CHU W K S. Temperature prediction for CO<sub>2</sub> laser heating of moving glass rods [J]. *Optics & Laser Technology* 2004, 36(2): 131~137
- [9] GRELLIER A, ZAYER N, PANNELL C. Heat transfer modelling in CO<sub>2</sub> laser processing of optical fibres [J]. *Opt Commun* 1998, 152: 324~328
- [10] WEI Ch Y, HE H B, DENG Zh *et al*. Study of thermal behaviors in CO<sub>2</sub> laser irradiated glass [J]. *Opt Engng* 2005, 44(4): 044202-1~044202-4

(上接第 485 页)