

水平平板上静态液滴的光学效应研究*

祁建霞¹, 苗润才²

(1 西安邮电学院 应用数学与应用物理系, 西安 710121)

(2 陕西师范大学 物理与信息技术学院, 西安 710062)

摘要:对液滴表面的光学衍射效应进行实验研究. 当用一准直、扩束的激光束自下而上, 垂直照射水平放置的平板上的静态液滴表面时, 得到了清晰、稳定的衍射图样. 衍射图样的强度分布随着入射光束半径的变化而变化. 当激光束半径改变到某一特定大小时, 衍射图样中心条纹消失. 通过对衍射条纹的分布与液体表面形态的理论分析, 并根据物理光学原理, 得到了条纹强度分布与激光束半径和入射面液面最大高度之间比值是相关的. 基于这一发现, 提出了一种液滴表面研究的非接触、有效实验方法.

关键词:光学效应; 静态液滴; 傅里叶变换

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2099-5

0 引言

润湿效应就是表征固液界面处的位移表面变化情况^[1]. 由于这一现象的特殊性, 其一直是实验和理论工作者的研究重点之一^[2-6]. 由于传统工业和新兴技术, 在最近几十年来, 相关研究工作进展很快^[7,8], 例如在应用流体控制领域中, 正确的理解界面处的相互作用是非常重要的^[9-12]. 众所周知, 通过对界面处相变特性的研究, 可以得到很多相关的物理特性, 这也是人们感兴趣的原因之一. 一般来说, 由于产生润湿效应的条件较特殊, 一般的测试是基于浸入原理, 这样就很容易破坏样品环境, 因此使测量结果带有很大的不确定性. 如何发展非接触式的测量成为研究方向之一. 根据光学透射和反射理论, 可以提供了一个研究平台, 因此, 许多光学方法也应用于研究液体的表面形变性质^[13-17]. 例如, 借助于三维干涉仪能够比较方便的得到液体表面的形貌特征^[18-19], 但不足之处是设备昂贵, 而且要求环境的稳定性要极好, 并且对液面的形变限度要求严格, 一般要小于 0.1 mm. 如前所述的研究中, 大部分的研究重心是流体的扩散或者固体细棒的润湿性质^[15-17]. 实际上, 由于润湿效应, 当液滴放置在水平平板上, 经过一段时间之后, 将会形成一个稳定的、具有空间对称分布的球冠形状. 在液滴的动态扩散方面, 研究较多, 并且发现液滴扩散的临界效应, 这对工业印染、金属涂覆等领域具有很高的应用价值^[20-23]. 但关于静态液滴的光学效应的研究报道却不是

多^[18,24-25]. 根据几何光学理论可知, 当一光束照射到弯曲液面上, 其反射光场的强度分布会随着曲面的曲率变化而变化. 所以就有可能通过光学方法得到弯曲液面的一些特性参量. 本文使用一准直、扩束的激光束, 自下而上垂直透射放置在水平平板上的液滴时, 实验得到了奇特的透射衍射图样, 并且发现, 衍射图样的光强分布与入射激光束的半径大小有关. 当改变激光束的半径大小时, 将会得到不同的衍射图样. 特别是, 当激光束的半径减小到某一特定值时, 衍射图样的零级条纹将会完全消失. 因此, 本实验中所观察到的现象并非圆孔衍射所产生的爱里图样. 平板上静态液滴对于入射光场具有相位调制作用, 通过对衍射图样的光强分布与液滴表面形态之间关系的理论分析, 根据物理光学原理, 得出了衍射图样的强度分布与激光束半径和以入射面为参考面液面最大高度的比值 r_0/h_0 是相关的, 并给出了强度分布的解析关系式, 较好地解释了零级条纹消失的实验现象, 得出了此时边界光线所对应的液面高度. 由此本文建立起一种通过对液体透射图样的强度分布来获取液滴的特性参量的实验测量方法. 同时由于液滴对入射光波的调制效应, 对液晶基板涂覆和微透镜制作也会有所帮助.

1 实验装置

实验装置原理如图 1. 实验装置由样品台, 激光光源, 光电数据采集和数据处理系统组成. 实验中, 一束准直、扩束的激光经扩束镜后, 经反射镜, 沿垂直方向、自下而上入射到水平放置的样品台上的静态液滴. 且圆形光斑以液滴为中心, 均匀覆盖液滴表面, 激光束透射过液体表面后沿入射光路, 经反射镜

* 西安邮电学院中青年科研基金(ZL2008-31)资助

Tel: 13636701099

Email: qjx_2001_ren@163.com

收稿日期: 2008-09-05

修回日期: 2008-10-15

进入光电采集系统,然后将采集到的图象信息,输入计算机进行处理.本实验使用的是具有良好单色性和方向性的 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm. 实验中要求样品台高度洁净,所用的样品为二次蒸馏水.为了尽可能减小外界对实验产生影响,实验之前样品台在蒸馏水中进行清洗.实验数据采集都是在准备工作做好之后尽可能短时间内进行,以保证所用样品的纯净度所受外界因素影响尽可能小.实验是在室温条件下进行,考虑到液滴的挥发性,实验室的空气湿度较高,实验中使用面阵 CCD 接收衍射图,并直接输入计算机存储和处理. CCD 的大小为 $7.95\text{ mm} \times 6.45\text{ mm}$, S/N 超过 48 dB.

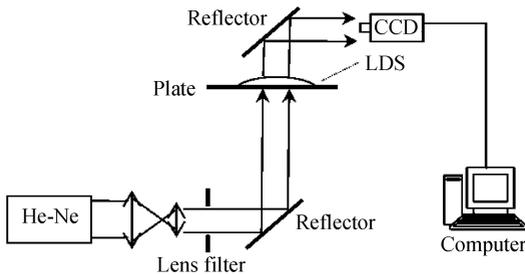


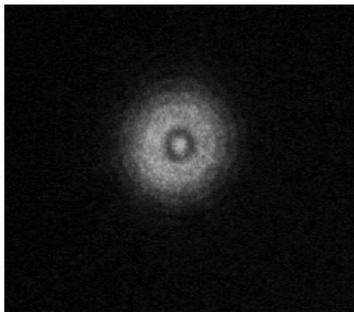
图1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

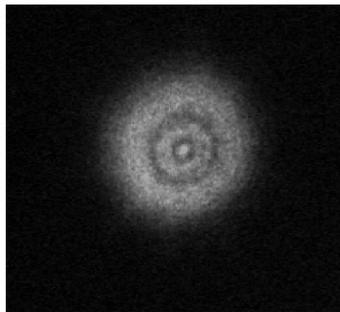
2 实验结果及描述

实验中,使用一个微型注射滴头将一小滴蒸馏水沉积在样品板上.当经过一段时间(大约几分钟),气液相达到平衡之后,将会形成一个具有确定接触角且液体表面为轴对称分布的液面.其中接触角大小取决于界面能,对于高表面能的液体来说,接触角趋于零度,而对于不挥发液体,液滴的体积将会保持恒定.

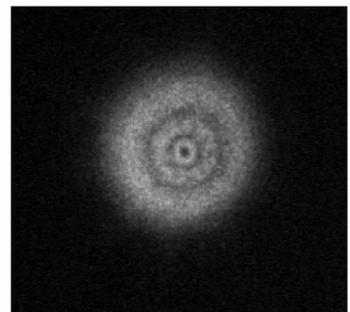
弯曲液滴表面的光学衍射图样如图2,其中图2(a)、(b)、(c)分别为不同半径大小的激光束入射时所得到的衍射图样.当入射激光束半径较大时,衍射图样如图2(a).需要说明的是,图2(a)的图样与一般情况下的衍射图样形式一致.在实验中,随着入射激光束半径的不断减小,衍射图样的光强分布也随之发生改变,高衍射级次出现,中心条纹的强度降低,如图2(b).继续减小激光半径,衍射图样的中心消失,如图2(c).上述实验说明,衍射图样的强度随着入射激光束的半径改变而改变.因此,基于这一实验发现,有可能通过分析衍射图样的光强变化来获取液面的相关特性.



(a)With large diameter beam



(b)With small diameter beam



(c)With smaller diameter beam, and $r_0/h_0=8.589$

图2 液滴表面的衍射图样

Fig.2 Diffraction patterns form the LDS

3 理论分析

由于润湿效应,放置在水平样品板上的液滴在气液相达到平衡之后,会形成一个具有空间轴对称分布的液滴表面,如图3.由于是轴对称分布,所以液面高度取决于径向位矢坐标,因此这里仅仅讨论

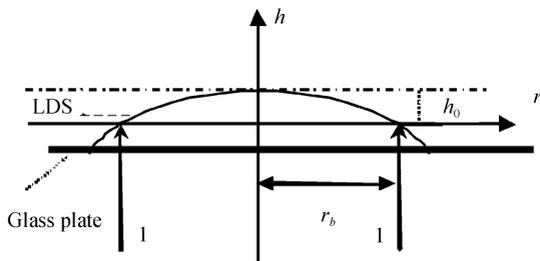


图3 实验原理

Fig.3 Schematic diagram of the experimental principle

液面高度 $h(r)$ 随位矢 r 变化的一维情况.

液滴成形条件很多,受到界面张力,温度,湿度等影响,所以控制条件很多,且较复杂,所以不能保证液滴对入射光波的傍轴近似条件成立,因此简单地认为液滴作为一平凸透镜,可能不是很准确.本文从液滴的动力学方程入手,求解出其外形特征方程.根据 Fraunhofer 远场衍射近似理论,研究其衍射场的光强分布.分析衍射图样的光强分布与入射激光束的半径及液面的关系,这种光强随着入射光束半径改变的现象可以通过傅里叶光学理论进行解释.尽管稳态液滴表面的形态描述比较复杂^[18,20,26],但仍然可以认为液面高度 $h(r)$ 和位矢 r 近似满足下面的解析式

$$\sigma \frac{d^2 h}{dr^2} + \frac{A}{6\pi h^3} = 0 \quad (1)$$

式中 h 是液面高度, r 是基板方向上的水平坐标, σ 是样品液体的表面张力, A 是 Hamaker 常量^[27]. 理论分析发现, 当 $A = e^{-14}$ erg 时, 理论和实验吻合较好. 式(1)为一微分方程, 可以求解为

$$h(r) = \frac{1}{\sqrt{c_0 c_1}} [(c_2 - \sqrt{c_0 c_1} r)^2 - 1]^{0.5} \quad (2)$$

式中 $c_0 = 4\pi\sigma/A$. 根据边界条件 $\begin{cases} r=0, h(0)=h_0 \\ r=r_b, h(r_b)=0 \end{cases}$,

这里需要说明的是, h_0 是以入射光束的入射截面为参考面, 液滴所具有的最高液面高度, 如图 3. 所以

有 $c_1 = \frac{\sqrt{c_0} h_0^2 - 2r_b}{\sqrt{c_0} r_b^2}$ 和 $c_2 = \frac{\sqrt{c_0} h_0^2 - r_b}{\sqrt{c_0} r_b}$ 成立. 式(2)通

过变量代换 $c_2 - \sqrt{c_0 c_1} r = 1/\cos \theta(r)$, 在液滴高度随矢径变化不明显的情况下, 有 $\tan \theta(r) \approx \sin \theta(r)$ 成立, 因此

$$h(r) = \frac{1}{\sqrt{c_0 c_1}} \sin \theta(r) \quad (3)$$

当一准直、扩束的激光束垂直透射在液滴上, 其入射波前将会受到液滴表面的调制作用, 因此在透射方向上将会观察到衍射图样, 并且这种调制能力大小与入射光束所覆盖的液面大小有直接关系. 根据傅里叶光学知识可知, 入射光波前所受到液滴曲面的相位调制可以认为是物函数的傅里叶变换, 在垂直入射的情况下, 物函数可写为^[28]

$$\exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) \frac{1}{\sqrt{c_0 c_1}} \sin \theta(r) \right] \quad (4)$$

那么相应观测面上的强度分布可以表示为^[31]

$$I(x') = \sum_q J_q^2 \left[\frac{2\pi(n-1)}{\lambda} \cdot \left(\frac{A}{6\pi\sigma} \right)^{0.5} \cdot \frac{r_b}{h_0} \right] \cdot \delta \left(f_r - q \frac{\theta(r)}{2\pi} \right) \quad (5)$$

这里 J_q 表示第一类型, 阶数为 q 的贝塞尔函数, δ 为脉冲函数, x' 为观测面上的位置坐标. 本实验中所使用的样品为二次蒸馏水, 环境温度为 21°C , $n = 1.33$, $\sigma = 0.0726$ N/m, 入射激光波长为 $\lambda = 632.8$ nm.

根据式(5)可知, δ 函数决定各级衍射图样的位置, 贝塞尔函数 $J_q^2 \left[\frac{2\pi(n-1)}{\lambda} \cdot \left(\frac{A}{6\pi\sigma} \right)^{0.5} \cdot \frac{r_b}{h_0} \right]$ 决定各级光斑光强的大小. 对于不同的 $\frac{r_b}{h_0}$, 光强 $J_q^2 \left[\frac{2\pi(n-1)}{\lambda} \cdot \left(\frac{A}{6\pi\sigma} \right)^{0.5} \cdot \frac{r_b}{h_0} \right]$ 是不同的, 这就提供了一种测量 r_b/h_0 的方法. 因此 LDS 的引入把能量从零阶分量转移到更高阶分量上去. 很明显, 零级、一级和二级衍射条纹的峰值强度是 r_b/h_0 的函数, 如图 4.

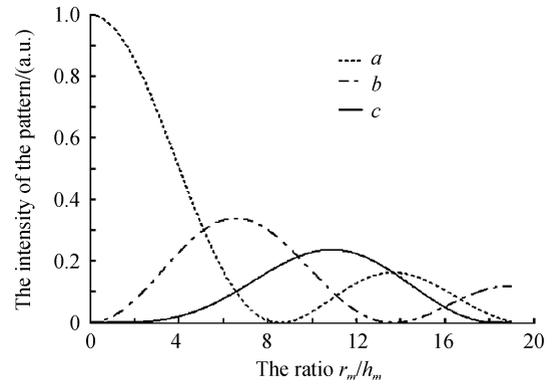


图 4 衍射条纹强度与 r_b/h_0 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the diffraction intensity and the ratio r_b/h_0 . Curve *a* represents the zero-order intensity of the diffraction fringe, curves *b* and *c* are the first and second orders

对图 4 分析可以知道, 当 $r_b/h_0 < 8.589$ 时, 零级衍射条纹的强度最大, 而更高级的衍射条纹的强度较低, 如图 3(a), 其中零级和一级衍射条纹表现比较明显. 当随着入射激光束半径的减小, 零级条纹的强度减弱, 而更高级的衍射条纹强度变大. 根据式(5)可知, 这是由于随着 r_b/h_0 增大, LDS 对入射光波的相位调制能力增强, 如图 4. 通过图 4 可以看出, 不同衍射级的条纹强度是随着 r_b/h_0 的变化而变化的, 当 r_b/h_0 是零阶贝塞尔函数 J_0 的一个根时, 那么此时对应的零级条纹完全消失. 实验中, 改变激光束半径, 也观察到了这种现象, 如图 3(c), 这表明由于 LDS 的相位调制作用, 将零级条纹的能量完全转移到了更高级别的衍射条纹上. 根据条纹零级消失条件, 得出此时 $r_b/h_0 = 8.589$, 将此值代入式(5), 得出各衍射级的条纹强度比值 $I_2/I_1 = 0.69$ (理论值). 同时编程对实验图样进行多次扫描求平均值, 各级强度比值为 $I_2/I_1 = 0.73$ (实验值), 实验与理论值的误差为 5.8% , 考虑到玻璃基板散射因素影响, 实验与理论符合较好. 在这种情况下, 入射激光束的半径为 1.6 mm, 根据式(3)可知 r_b/h_0 为 8.589 , 故可以得知此时液面高度 $h_m = 0.186$ mm.

4 结论

研究了放置在水平平板上的静态液滴对透射光场的调制效应. 当一液滴放置在水平平板上, 将会形成一个具有轴对称分布的球冠液滴. 当用准直、扩束的激光束自下而上的透射液滴后, 在接收平面上将会观察到衍射图样. 实验表明, 衍射图样的光强分布与入射激光束的半径大小有关. 当入射激光束的半径较大, 衍射图样中包含零级和一级衍射条纹. 随着入射激光束半径的减小, 衍射图样中的零级条纹强度减弱, 而出现了更高级别的衍射条纹, 当激光半径

减小到一定程度后,零级衍射条纹消失.对此,根据傅里叶光学原理,结合液滴形貌的特征,理论上发现,衍射图样的光强分布和入射激光束的半径与液面高度之间的比值 r_b/h_0 有关.基于这一理论分析,得到了在衍射零级消失时,边界光线所对应的液面高度,这为我们提供了一种具有空间对称分布的透明液体形貌的研究方法.并且基于这一实验现象,可以应用于液晶基板涂覆和微透镜制作方面的研究.

参考文献

- [1] EGGERS J, HOWARD A S. Characteristic lengths at moving contact lines for a perfectly wetting fluid; the influence of speed on the dynamic contact angle[J]. *J Fluid Mech*, 2004, **505**:309-321.
- [2] KOTZ K T, NOBLE K A, FARIS G W. Optical micro-fluidics [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(13):2658-2660.
- [3] NEWTON M I, BANERJEE M K, STARKE T K H. Surface acoustic wave-liquid drop interactions[J]. *Sensor Actuat*, 1999, **76**(1-3):89-92.
- [4] EVANS R, ROTH R, BRYK P. Wetting at curved substrates; Non-analytic behavior of interfacial properties[J]. *Europhys Lett*, 2003, **62**(6):815-914.
- [5] ABEL G, ROSS G G. Wetting of a liquid surface by another immiscible liquid in microgravity[J]. *Adv Space Res*, 2004, **33**(8):1431-1438.
- [6] DARHUBER A A, TROIAN S M. Dynamics of capillary spreading along hydrophilic microstripes [J]. *Phys Rev E*, 2001, **64**(3):031603(1-5).
- [7] GENNES P G. Wetting: statics and dynamics[J]. *Rev Mod Phys*, 1985, **57**(3):827-951.
- [8] LIPOWSKY R. Universality classes for critical wetting [J]. *Phys Rev B*, 1985, **32**(3):1731-1765.
- [9] BLAKE T D, SHIKHMURZAEV Y D. Dynamic wetting by liquids of different viscosity[J]. *J Colloid Interf Sci*, 2002, **253**(1):196-202.
- [10] FAN H, GAO Y X. Stability analysis for liquid-bridging induced contact[J]. *J Appl Phys*, 2003, **93**(5):2554-2559.
- [11] DUSHKIN C D, KRALCHEVSKY P A. Lateral capillary forces measured by torsion microbalance[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **75**(19):3454-3457.
- [12] LATVA-KOKKO M, ROTHMAN D H. Static contact angle in lattice boltzmann models of immiscible fluids[J]. *Phys Rev E*, 2005, **72**(4):046701(1-7).
- [13] GHARIB M, WEIGAND A. Experimental studies of vortex disconnection and surface connection at a free surface[J]. *J Fluid Mech*, 1996, **321**:59-62.
- [14] CHUNG Y J, KANG S H. Laminar vortex shedding from a trapezoidal cylinder with different height ratios [J]. *Phys Fluids*, 2000, **12**(5):1251-1257.
- [15] BOURIMBORDE L V, TONSO A O, COLAUTTI C M. Real-time measurement of the meniscus shape using the Talbot effect[J]. *Opt Comm*, 1993, **102**(5):397-405.
- [16] DONG J, MIAO R C, QI J X. Visualization of the curved liquid surface by means of the optical method [J]. *J Appl Phys*, 2006, **100**:124914(1-6).
- [17] MIAO R C, YANG Z L. Critical light reflection from curved liquid surface[J]. *Opt Comm*, 2003, **218**(4):199-203.
- [18] TANNER L H. The spreading of silicone oil drops on horizontal surfaces[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1979, **12**(9):1473-1484.
- [19] TAKEDA M, MOTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(24):3977-3982.
- [20] CHEN J D, WADA N. Wetting dynamics of the edge of a spreading drop[J]. *Phys Rev Lett*, 1989, **62**(26):3050-3052.
- [21] SNOEIJER H J, DELON G. Avoided critical behavior in dynamically forced wetting[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(17):174504(1-3).
- [22] PREVOST A, ROLLEY E, GUTHMANN C, et al. Dynamics of the contact line on rough substrates[J]. *Physica B*, 2000, **284**(1):145-156.
- [23] KWOK D Y, CHEUNG L K, PARK C B, et al. Study on the surface tensions of polymer melts using axisymmetric drop shape analysis[J]. *Polym Eng Sci*, 1998, **38**(5):757-764.
- [24] MIAO Run-cai, ZHU Jing-tao, YANG Zong-li. The effect of transmittance light obstructed by liquid surface and its application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4):489-491. 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.
- [25] QI Jian-xia, MIAO Run-cai, DONG Jun. The theoretical and experimental study of the curved liquid surface by means of the optical method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7):1468-1472. 祁建霞, 苗润才, 董军. 光学方法对润湿效应形成弯曲液面的理论及实验研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(7):1468-1472.
- [26] HERVET H, GENNES P G. Dynamics of wetting of "dry" solid[J]. *C T Acad Sci*, 1984, **11299**(2):499-504.
- [27] VISSER J. This review shows that for most systems the values of θ usually range from e^{-14} to e^{-12} erg[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 1977, **3**:331.
- [28] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics [M]. San Francisco: McGraw-Hill, 1968.

Liquid Drop Surface on Horizontal Plane by Means of Optical Method

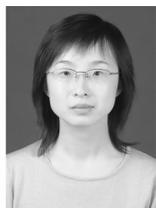
QI Jian-xia¹, MIAO Run-cai²

(1 *Department of Applied Mathematics & Applied Physics, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China*)

(2 *Institute of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

Abstract: The optical effect of the steady droplet on the horizontal plane was studied. When a collimated-beam illuminated upon the symmetric droplet surface form below in a vertical direction, the steady and visible diffraction pattern was observed experimentally, and the relationship between the intensity distribution of the pattern and the illuminated area covered by the beam was found. While the diameter of the beam changes from larger to small, the intensity distribution of the pattern changes, either. The disappearance of the zero-order diffraction fringe, which corresponds to the 100% efficiency, was also observed in the experiment. Based on the physical optical theory, the analytic expression of the intensity distribution of pattern was derived, which explained the disappearance of the zero-order fringe well, and the height of the droplet at the certain position was also obtain. A novel method for the axisymmetric liquid surface deposited on the horizontal plane was found.

Key words: Optical effect; Steady liquid droplet; Fourier transform



ZQI Jian-xia was born in 1980. She graduated from Institute of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, and her research interests include physics optics and optical measurement.