

文章编号:1004-4213(2011)07-1101-5

# 液体薄膜遮光效应的研究

苗润才, 高美玲, 韩鹏斌, 李能能

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

**摘 要:**当激光束通过静态液体薄膜时,由于表面的全反射效应能够观察到液体薄膜的遮光效应.在此基础上,以白光为光源研究了液体薄膜的遮光效应.结果显示,白光光源的遮光图样非常清晰,且无激光散斑效应;遮光图样的中心是一个光强极强的亮域,该区域的外部为两个同心的环状暗场,两个暗场之间是亮场,亮暗边界十分清楚;液体薄膜遮光图样的半径大小与液体的折射率有关,液体折射率越大,遮光图样的半径越大.本文给出了液体薄膜遮光半径与液体折射率的解析关系,分析了遮光图样产生的必要与充分条件,并根据液体薄膜的遮光效应,建立了一种测量液体折射率的新方法,测量了纯净水的折射率.结果表明,该测量值与传统方法所测折射率的值相吻合且该方法具有设备简单、操作简便、重复性好、准确度高等特点.

**关键词:**液体薄膜;遮光效应;折射率

中图分类号:O435; 1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114007.1101

## 0 引言

液体表面的光学检测为研究液体的物理性质提供了一种非常有效的方法.液体表面检测可以分为两大类:一类是动态表面,另一类是静态表面.动态表面检测常用光学方法来检测液体表面运动的规律,进而给出表面的物理参量.例如用液体表面波对光的衍射、干涉等效应来检测液体表面物理参量<sup>[1-3]</sup>.静态表面检测常用静态液体表面对光的反射和折射等效应,通过光的强度分布以及光强度与液体物理参量之间的关系来研究液体的性质<sup>[4-6]</sup>.近年来,本课题组在该方面进行了研究并取得了一些研究成果<sup>[7-11]</sup>.在静态表面光学效应的研究中发现了液体的遮光效应<sup>[12]</sup>.在这一研究中发现,要观察到明显的遮光效应,需要大量液体,但对于少数贵重液体来说不太实用;又由于液体量多容易受周围环境振动的影响,液体表面晃动,严重影响遮光图样的测量.本文提出了用液体薄膜来测量液体的折射率,并用白光作为光源,得到了液体薄膜清晰的遮光图样.通过讨论液体薄膜遮光图样产生的机理,分析了液体薄膜折射率与遮光半径之间的解析关系.由液体薄膜折遮光效应产生的条件,得出了上下玻璃厚度对液体薄膜遮光图样的影响,并用该方法测量了蒸

馏水的折射率.

## 1 实验及实验现象

实验装置如图 1,主要包括:光源、光阑、散射面、样品和观察系统.光源可以采用激光光源,普通白光光源,半导体光源等,本实验采用普通的白光光源.光阑带有通光小孔,通光小孔的直径约 0.5 mm.散射面可采用普通白纸或毛玻璃.散射面上方为测量样品,透明或半透明的固体或液体均可以作为测量样品.观察系统可用 CCD 成像系统,也可采用读数系统,读数系统与读数显微镜类似,保留读数显微镜系统中的读数结构,而观察结构不需要显微放大,直接观察即可.

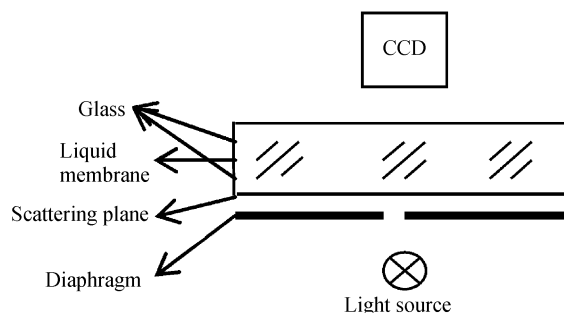


图 1 实验装置  
Fig. 1 Experiment setup

基金项目:陕西省重大科技创新专项基金(No. 2010VKC01-18)和陕西省自然科学基金(No. 2010JM1003)资助

第一作者:苗润才(1957-),男,教授,博导,主要研究方向为液体表面波. Email:rcmiao@snnu.edu.cn

通讯作者:高美玲(1983-),女,硕士研究生,主要研究方向为液体表面波. Email:gaomeiling1119@163.com

收稿日期:2011-01-06;修回日期:2011-02-23

步骤一, 首先将普通白纸放在水平放置的光阑上面, 再将玻璃样品紧压在白纸上, 玻璃的厚度为 10.00 mm. 用白光照射光阑的通光小孔, 在玻璃样品的正上方观察白纸的散射面, 可以观察到特殊的光学图样, 用 CCD 拍摄这一图像, 其结果如图 2(a). 由图 2(a) 可以看出, 中心是一个光强极强的区域, 该区域的外部仍然是一个亮区, 形状为圆形. 与中心亮区相比, 外部圆形亮区光强较弱. 该亮区的外围是一个暗区, 亮暗区域的边界十分清晰.

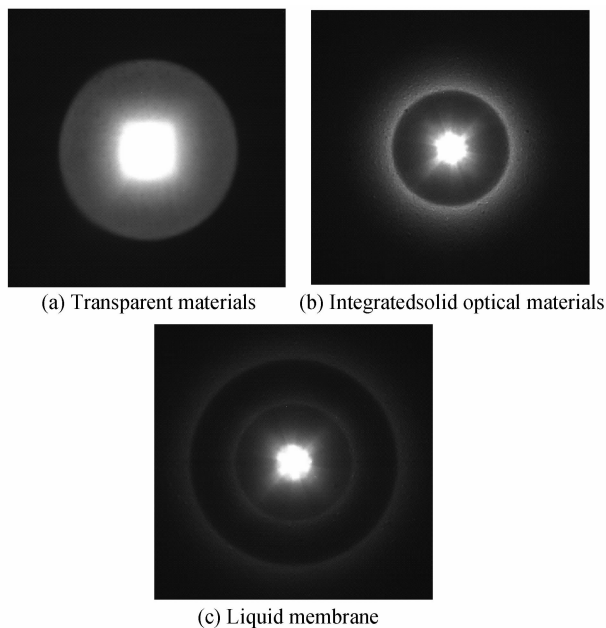


图 2 遮光图样  
Fig. 2 The obstructed light photos

步骤二, 在实验一的基础上, 去掉白纸和玻璃样品, 用厚度为 9.96 mm 的毛玻璃压在光阑的上面. 毛玻璃的毛面紧贴光阑, 毛面朝下. 同样用白光照射光阑的通光小孔, 在毛玻璃样品的正上方观察毛玻璃的散射面, 可以观察到特殊的光学图样, 再用 CCD 拍摄, 其结果如图 2(b). 与图 2(a) 相比, 中心仍然是一个光强极强的区域, 图 2(a) 和图 (b) 中心亮区外围亮暗刚好相反, 即图 2(b) 中心亮区外部变成了一个暗区, 形状仍为圆形. 该暗区的外围是一个亮区, 亮暗区域的边界也十分清晰.

步骤三, 在实验二的基础上, 往毛玻璃的上表面滴加几滴待测液体, 再将一普通玻璃紧压在液体上面. 同样用白光照射光阑的通光小孔, 在毛玻璃样品的正上方观察毛玻璃的散射面, 可以观察到特殊的光学图样, 其结果如图 2(c). 与图 2(b) 相比可以看出, 中心仍然是一个光强极强的区域, 该区域的外部变成了一个暗区, 形状仍为圆形. 暗区的外围是一个很窄的圆环形亮区, 圆环形区域外又是一个环形暗区, 外围也为亮区, 亮暗区域的边界也十分清晰.

## 2 理论分析

### 2.1 透明材料的遮光效应

对于透明光学材料(如玻璃), 其结构如图 3: 设介质的折射率为  $n_1$ , 厚度为  $h$ , 透明介质的上、下表面均为光学面, 并将透明固体紧压在散射体上, 介质放置于折射率为  $n_0$  的环境中, 且  $n_1 > n_0$ . 在介质下表面 O 处放置白光光源, 光透过通光小孔经玻璃下表面散射后在介质中可看作球面波. 光线将通过透

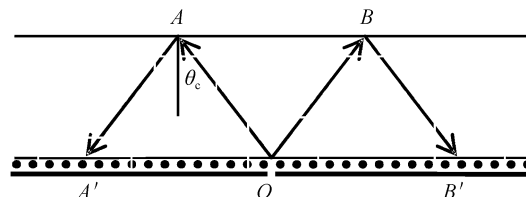


图 3 透明材料遮光效应原理  
Fig. 3 The principle of transparent materials obstructing light effect

明介质传播至介质的上表面. 由于  $n_1 > n_0$ , 则光线在上表面处会发生全反射. 根据全反射原理, 则对应的临界角  $\theta_c$  满足

$$\sin \theta_c = n_0 / n_1 \quad (1)$$

由式(1)可知: 当入射在上表面上的光线, 其入射角小于  $\theta_c$  时, 在该表面上一部分光反射, 一部分折射. 折射的光透过该界面进入另一种介质. 但是, 当入射角大于  $\theta_c$  时, 光将发生全反射. 由于全反射, 这部分光不可能透过光学透明材料的上界面, 故把这种效应称之为表面的遮光效应.

图 3 中, 设光线 OA、OB 的入射角恰为临界角  $\theta_c$ , 即在 AB 区域外的入射光线. 由于入射角大于临界角, 这部分光不能从透明介质的上表面透出, 全部被反射回透明介质内. 全反射的光又入射在介质的下表面 A'B' 区域外, 由于介质的下表面与上表面所处环境一样, 即在该界面入射光的入射角仍然大于临界角, 这部分光将在下表面再次发生全反射, 又被反射回介质内传播到上表面, 再次被反射. 即 AB 区间外的这部分光在透明介质上、下表面不断发生全反射, 这部分光不能从透明固体介质内透射出. 照射在介质上表面 AB 区间内的入射光线, 由于入射角小于临界角  $\theta_c$ , 所以绝大部分光在上界面发生折射; 而入射在介质上表面 AB 区间内的小部分将发生反射, 被反射到下表面 A'B' 区间内, 同样在透明光学材料的下界面由于入射角小于临界角  $\theta_c$ , 光将发生折射.

由讨论可知: 对于光学透明材料而言, 由于全反射效应, 在该材料的下表面上, A'B' 区间内有光从该界面透出, 而此区间以外, 没有光线透出. 由于在

紧贴该透明材料的下表面放置了一散射面,所以当观察该散射面时:在  $A'B'$  区间外形成暗区,而在  $A'B'$  区间内形成一个圆形亮区,把这一图样称为遮光图样,把该圆的半径定义为遮光半径.在  $A'B'$  区间的中心,是点光源所处的位置,由于点光源的光强度相对较强,同时由于点光源附近的散射作用,所以在  $A'B'$  区间的中心部位观察到一个强度很强的中心亮斑.

设遮光半径  $r$ ,由几何光学知

$$\sin \theta_c = \frac{r}{\sqrt{4h^2 + r^2}} \quad (2)$$

式中  $h$  为透明介质的厚度.结合式(1)和(2),有

$$r = \frac{2hn_0}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,遮光半径与透明介质的厚度和折射率有关:当透明介质的折射率一定时,厚度越厚,遮光半径越大;当透明介质的厚度一定时,折射率越大,遮光半径越小.这与实验现象完全一致.

## 2.2 集成固体光学材料的遮光效应

如果将透明光学材料与它下面的散射体集于一体,形成一个集成固体光学材料,则该材料上表面为光学平面,下表面为散射面(如单面毛玻璃).原理如图4,对于集成固体光学材料,设光线  $OA$ 、 $OB$  的入射角恰为临界角  $\theta_c$ ,与前文讨论类似,在  $AB$  区间外的入射光线,由于入射角大于临界角,这部分光不能从透明固体介质的上表面透出,全部被反射回透明介质内.全反射的光又入射在介质的下表面  $A'B'$  区域外,由于介质的下表面为一散射面,当观察该面时,  $A'B'$  区域外形成外围亮区.照射在介质上表面  $AB$  区间内的入射光线,由于入射角小于临界角  $\theta_c$ ,绝大部分光在上界面发生折射后透过上表面.在该区域内,仍有一部分光经该表面反射后照射下面  $A'B'$  区域内.与全反射光相比,其强度较弱,因而在  $A'B'$  区域外形成亮区,在该区域内为暗区.中心区域仍然有一个强度极强的小亮斑,形成原因与2.1节相同.对比两种情况下的遮光图样可知:厚度和折射率相同的条件下,所形成的遮光半径大小相同,且中心都存在光源所形成的中心极亮斑.但不同的是,前者中心为亮区,外围为暗区,而后者刚好

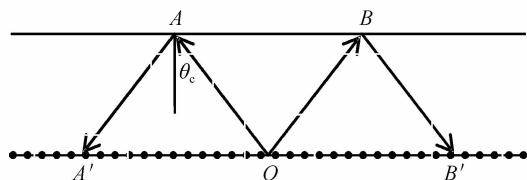


图4 集成固体光学材料遮光效应原理

Fig. 4 The principle of integrated solid optical materials obstructing light effect

相反.

## 2.3 液体薄膜的遮光效应

在图4玻璃上表面滴少许待测液体,液体上面再加一块玻璃.轻轻挤压两块玻璃,此时在两块玻璃之间就形成了一层均匀的液体薄膜.假设上下两块玻璃折射率相同,并为  $n_1$ ,液体薄膜折射率为  $n_2$ ,两块玻璃所处的环境的折射率为  $n_0$ ,且  $n_1 > n_2 > n_0$ .如图5,在介质下表面  $O$  处放置一个白光光源,光源发出的光经过小孔到玻璃下表面,玻璃下表面为一毛面,经该面散射后的光传播至液体薄膜.由于  $n_1 > n_2$ ,则光线在液体与玻璃的界面上会发生全反射.设光线  $OA$ 、 $OB$  的入射角恰为临界角  $\theta_c$ ,与上两节讨论的类似,由于液体与玻璃的界面上的全反射效应,所以在玻璃下面的毛面上,形成  $A'B'$  区域内为暗区,  $A'B'$  区域为亮区的遮光图样.

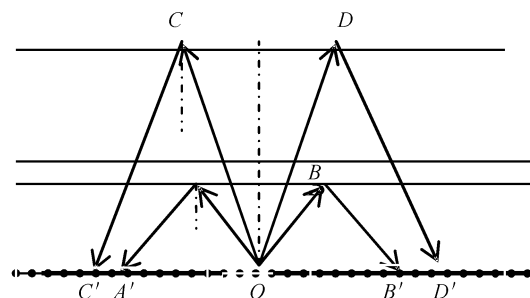


图5 液体薄膜遮光效应形成机制

Fig. 5 The principle of liquid membrane obstructing light effect of liquid membrane

在  $AB$  区域内的入射光线,由于入射角小于临界角  $\theta_c$ ,这部分光经液体薄膜折射后进入液体薄膜上方的玻璃,由于液体薄膜厚度非常薄,可以近似地认为液体薄膜内光线的入射点与出射点位置相同.在玻璃与空气的界面处,由于  $n_1 > n_0$ ,则光线在该界面也发生全反射.设该界面临界角为  $\theta_c$ ,又因为  $n_2 > n_0$ ,所以有  $\theta_c < \theta_c$ .设光线  $OC$ 、 $OD$  的入射角恰为临界角  $\theta_c$ ,在  $CD$  以内的入射光线,大部分经玻璃的上界面折射后进入空气.而入射在  $CD$  区间外的光线,经上表面反射后,再经液体薄膜传至毛玻璃的毛面的  $C'D'$  区间外,经玻璃毛面散射后在  $C'D'$  外为亮区,  $C'D'$  内为暗区.

由讨论可知:由于玻璃与液体薄膜的界面上的全反射,会在玻璃的毛面上形成遮光图样,同样由玻璃与空气的界面上的全反射,也会在毛面上形成遮光图样.要观察液体薄膜的遮光效应的必要与充分条件是:前者的遮光半径一定要小于后者的遮光半径现在来定量的讨论该条件.设前者的遮光半径为  $r$ ,后者的遮光半径为  $r'$ .

由式(3)有

$$r = \frac{2hn_2}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (4)$$

式中  $h$  为下层玻璃的厚度.

同样根据式(3)可以得到

$$r' = \frac{2(h+h')n_0}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \quad (5)$$

式中  $h'$  为上层玻璃厚度.

观察液体薄膜遮光效应的必要与充分条件是薄膜的遮光半径小于等于玻璃上表面形成的遮光半径. 即

$$r' \geq r \quad (6)$$

将式(4)和(5)代入式(6)有

$$\frac{h'}{h} \geq \frac{n_2}{n_0} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2}} - 1 \quad (7)$$

当  $n_0 = 1$ , 则式(7)可简化为

$$\frac{h'}{h} \geq n_2 \sqrt{\frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 - n_2^2}} - 1 \quad (8)$$

由式(8)可知:当待测液体的折射率越接近玻璃的折射率时,上下玻璃的厚度比就越大.当玻璃的折射率  $n_1 = 1.5111$ , 待测液体为蒸馏水,其折射率  $n_2 = 1.3333$ 时,得到上下玻璃厚度之比为 1.124.

作为液体薄膜遮光效应的应用,本文测量了蒸馏水的折射率.由式(4),可以得到液体折射率  $n_2$  满足

$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{r^2}{4h^2 + r^2}} \quad (9)$$

由式(9)可知:当玻璃厚度  $h$  及其折射率  $n_1$  一定,直接测出液体薄膜产生的遮光半径  $r$ ,则可以得到液体的折射率  $n_2$ . 实验中,毛玻璃的厚度  $h = 9.96$  mm, 折射率  $n_1 = 1.5111$ . 所加玻璃的厚度为 16.23 mm, 测量蒸馏水的遮光半径  $r = 37.828$  mm, 将这些数据代入式(9),得到蒸馏水的折射率  $n_2 = 1.337$ , 该测量值与传统方法所测折射率的值相吻合. 分析该方法的实验误差,主要由两方面原因引起:实验中的直接测量的遮光半径会产生读数误差;另外,实验时光源有一定的大小,光源线度较大时,遮光图样的衬度较高,但光源线度较大时,遮光图样的边界模糊,因而造成测量误差.

### 3 结论

1)研究了透明固体光学材料、集成固体光学材料的遮光效应.观察到这两种材料的遮光效应的光学图样.对于透明固体光学材料,其遮光图样中心是一个光强极强的区域,该区域的外部仍然是一个亮区,形状为圆形.对于集成固体光学材料的遮光图样中心仍然是一个光强极强的区域,而中心亮区外围

正好相反,为一暗区,形状为圆形.同时给出了两种情况下遮光半径与固体材料的折射率及厚度的解析关系;

2)发现了液体薄膜的遮光效应,观察到液体薄膜的遮光图样.其中心是一个光强极强的区域,该区域的外部仍然是一个暗区,形状为圆形.讨论了液体薄膜遮光图样产生的必要与充分条件,给出了液体薄膜遮光半径与液体折射率的解析关系;

3)用白光作为光源,得到了固体材料和液体薄膜的遮光图样,与文献报道的激光光源相比,白光光源的遮光图样非常清晰,且无激光散斑效应;

4)作为液体薄膜遮光效应的应用,测量了蒸馏水的折射率.其测量值与传统方法所测折射率的值相吻合.

#### 参考文献

- [1] MOORE K D, JAFFE J S, OCHOA B L. Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-Bath [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, **17**(8): 1106-1117.
- [2] ANTONELLI L, BLACKMON F. Experimental demonstration of remote, passiveacousto-optic sensing [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, **116**(6): 3393-3403.
- [3] BEHROOZI F, PERKINS A. Direct measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser interferometry [J]. *American Journal of Physics*, 2006, **74**(11): 957-961.
- [4] PADDAY J F, PITT A R, PASHLEY R M. Menisci at a free liquid surface: surface tension from the maximum pull on a rod [J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1975, **71**(1): 1919-1931.
- [5] KAISER N, CRÖLL A, SZOFRAN F R, et al. Wetting angle and surface tension of germanium melts on different substrate materials [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, **231**(4): 448-457.
- [6] MIAO Run-cai, SHI Jian, ZHAO Xiao-feng. Determination of the attenuation coefficient of surface acoustic wave by means of the light interference [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 382-385.
- [7] QI Jian-xia, MIAO Run-cai, DONG Jun. Theoretical and experimental study on curved liquid surface by means of 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.
- [8] MIAO Run-cai, YANG Zong-li, ZHU Jing-tao. Critical light reflection from curved liquid surface [J]. *Optics Communications*, 2003, **218**(4-6): 199-203.
- [9] MIAO Run-cai, DONG Jun, QI Jian-xia, et al. The asymmetry of diffraction patterns from liquid surface waves [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 1921-1924. 苗润才, 董军, 祁建霞, 等. 低频液体表面波衍射条纹的不对称性 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 1921-1924.
- [10] MIAO Run-cai, ZHAO Xiao-feng, SHI Jian. Modulated interference of reflected light from a liquid surface wave at tens Hertz frequencies [J]. *Optics Communications*, 2006, **259**(2): 592-597.
- [11] MIAO Run-cai, YANG Zong-li, ZHU Jing-tao, et al. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic wave by

- means of optical diffraction[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(17): 3033-3035.
- [12] MIAO Run-cai, ZHU Jing-tao, YANG Zong-li. The shading effect of the 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.

## Light Obstructing Effect of Liquid Membrane

MIAO Run-cai, GAO Mei-ling, HAN Peng-bin, LI Neng-neng

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

**Abstract:** When a laser beam passes through the static liquid membrane, the light obstructing effect is observed due to surface total reflection. Based on this fact, the similar light obstructing effect was also observed using a white light source, and the obtained obstructed light photos were clear and with no laser speckles. The obstructed light pattern consists of a bright region with significantly high light intensities in the center, two strip-shape dark regions outside, and a bright field between these two strip-shape dark regions. The boundaries between these bright and dark regions were clear. It was found that the radius of obstructing increases with the increasing of the refractive index. Moreover, the relationship between the liquid membrane refractive index and the radius of light obstructed was derived, and the necessary and sufficient conditions of the obstructed light photos for liquid membrane were also analyzed. Therefore, according to the effect of light obstructing of liquid membrane, a new method for measuring liquid refractive index was proposed. The refractive index of pure water was measured and the obtained results were good in line with those measured by the traditional methods. The proposed method has advantages in simplifying the equipments and operations, and also possesses sound reliabilities and high measuring accuracy.

**Key words:** Liquid membrane; Light obstructing; Refractive index