

文章编号: 0258-7025(2004)06-0752-05

低频液体表面波的激光干涉测量

苗润才¹, 赵晓凤², 时 坚²

(¹ 榆林学院物理系, 陕西 榆林 719000; ² 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062)

摘要 对于频率为几十赫兹的液体表面声波, 提出了一种激光干涉测量方法, 并在实验上观察到了反射光所形成的稳定的、清晰的调制干涉图样, 干涉图样被限制在一定的空间区域内, 其强度分别在两边界位置达到极大, 形成了两个极亮点。理论上导出了调制干涉图样光强度、干涉条纹角宽度、干涉区域角宽度与表面声波之间的解析关系, 并与实验数据进行了对比。基于这一发现, 建立起一种适应测量低频表面声波特性及表面张力的实用方法。

关键词 激光技术; 干涉; 表面声波; 液体表面

中图分类号 O 348.11 **文献标识码** A

Measurement of Low-Frequency Surface Acoustic Wave on Liquid Surface by Means of Laser Interference

MIAO Run-cai¹, ZHAO Xiao-feng², SHI Jian²

¹ Department of Physics, Institute of Yulin, Yulin, Shaanxi, 719000, China

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

Abstract A laser interference technique for measuring liquid surface acoustic wave at a few tens Hertz was designed and the high visibility and modulated interference fringes, which are formed by the reflective light beam from the liquid surface, were obtained experimentally. The interference fringes are confined in a certain space range and the double brightest spots locate at the both extreme positions of this range. An analytic intensity expression of the light from the liquid surface, the angle space of the interference fringes and the angle width of the interference fringe range with the surface acoustic wave were derived theoretically. The results show that the theory predication is well consistent with experimental data. Moreover, a practical technique can be developed, based on the discovery, to measure the properties of the surface wave at these frequencies and the dynamic surface tension.

Key words laser technique; interference; surface acoustic-waves; liquid surface

1 引 言

自 20 世纪 60 年代激光问世以后, 就很快用于研究表面声波(SAW)。对于高频表面声波, 绝大部分研究是建立在声波光衍射效应的基础上。根据声光衍射原理, 如果表面声波的频率较大, 则引起的衍射光角分离较大, 所以这类实验大多是针对超声表面波进行的^[1~5]。对于液体表面声波, 我们曾用衍射的方法将表面波的频率下延至几百赫兹^[6,7]。对于频率小于几赫兹的表面声波, 通常采用激光表面波斜率扫描技术, 因为在这一频段上, 表面声波波长

比扫描激光光斑大得多^[8,9]。然而对于几十赫兹频率的表面声波, 由于声波波长比入射激光波长大多, 因而不适合用光衍射技术; 同时又由于声波波长与扫描激光光斑相当, 所以也不能采用激光斜率扫描技术。因此, 对这一频段的液体表面声波, 几乎没有人考虑用激光技术测量液体表面波。虽然 Barter^[10,11] 等曾采用透射成像技术分析过这些频率下的表面声波, 但在此研究中, 液体必须染色, 也就是说这一方法不适用于像水这样的透明液体。本文通过光的干涉技术, 研究几十赫兹频段的液体表面

收稿日期: 2003-03-05; 收到修改稿日期: 2003-07-21

作者简介: 苗润才(1957—), 男, 陕西乾县人, 榆林学院教授, 博士, 博士生导师, 主要从事声光理论及技术研究。E-mail: rcmio@snnu.edu.cn 或 rcmio@yahoo.com.cn

声波,在实验上得到清晰的调制干涉图样,理论上导出了调制干涉图样光强度与表面声波之间的解析关系,并与实验数据进行了对比。基于这一发现,提出了一种适应测量低频表面声波特性及表面张力的实用方法。

2 实验装置

实验装置及实验原理如图 1 所示,低频信号发生器的输出驱动表面声波激发器,信号发生器的输出在几十赫兹的频段,表面声波激发器在液体表面上产生表面声波。氦-氖激光束被分束器分为两束,一束用来监控激光输出的稳定度,另一束直接照射到液体表面波上。激光束的光斑直径约为 2.4 mm,因为激光束斜入射在液体表面,所以液面上入射光斑为一椭圆形,其长短轴分别为 23 mm 和 2.4 mm。长轴与表面波传播方向平行,光斑大约照亮 2~3 个波形。实验中,入射角大约为 1.43 rad,激光波长为 632.8 nm。液体样品池放在一个可调节位置及温度的金属板上,表面声波激发器固定在一个可以上下左右调节位置的支架上,这样可以改变振源与光入射点间的距离。入射光点与观察屏间的距离大约为 5 m。在观察屏上可观察到清晰的干涉图样,用 CCD 检测干涉图样,并将数据直接输入计算机。在计算机上可以显示、储存、处理干涉图样。CCD 的大小为 7.95mm×6.45mm,信噪比超过 48 dB。

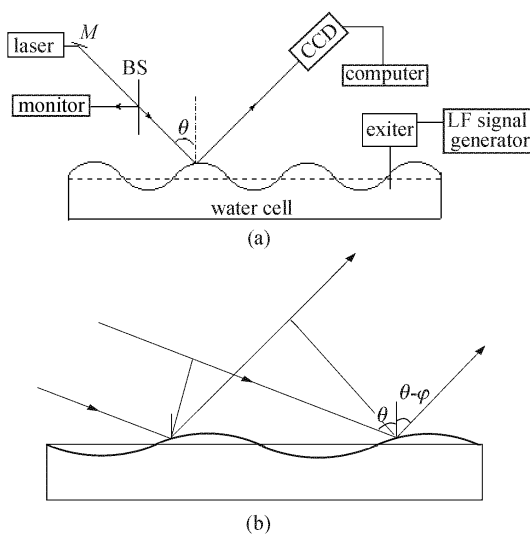


图 1 (a) 实验装置图;(b) 实验原理图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the experimental setup;
(b) Principle of light interference from the SAW at
tens of Hertz frequencies

3 理论分析

虽然实际上液体表面粒子运动较为复杂,但在理论处理时,常把这种运动近似为正弦波,因此,表面波波函数可写为

$$Y = A \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

式中 Y 为横向坐标, x 为沿波传播方向的坐标, A 为表面声波振幅, ω 为表面声波频率, k 为波矢量,且 $k = 2\pi/\Lambda$, Λ 为表面声波波长。若液体表面波为几十赫兹的频率,未扩束的激光照射在液体表面波上,且假定沿波传播方向的光斑长轴刚好包括两个表面声波波长,现在考虑两个表面声波波形的反射光区域。如图 1(b) 所示,一个波上任意一点的反射光束与相邻波上相应点的反射光束有相同的反射方向。因为这两点对应的波的斜率相同,所以两束反射光以相同方向传播,假定反射光束与竖直方向上的夹角为 $\theta - \varphi$ 。由于光速远大于表面声波速度,在计算两束光的光程差时可近似认为波形无变化。通过对图 1(b) 的分析,根据物理光学的干涉原理,很容易得到反射区域强度表达式为

$$I_r(\varphi) = I_m(\varphi) \cos^2 \left\{ \frac{\pi\Lambda}{\lambda} [\sin\theta - \sin(\theta - \varphi)] \right\} \quad (2)$$

式中 $I_r(\varphi)$ 表示反射光强度为 φ 的函数, $I_m(\varphi)$ 为强度调节因子,将在下面讨论。 λ 为光波波长, θ 表示光的入射方向, $(\theta - \varphi)$ 表示反射方向。由(2) 式可知,在远场观察面上会有干涉条纹。相邻条纹间距相对入射点的张角 $\Delta\varphi$ 可写为

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{\Lambda \cos(\theta - \varphi)}$$

因为 φ 角远远小于入射角 θ , 上式可被近似为

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{\Lambda \cos\theta} \quad (3)$$

在几十赫兹频率时,表面波波长远大于入射光波长,因此为了得到较大的张角 $\Delta\varphi$, 入射角 θ 应尽量大一些。

如前面提到的,表面波任一点上反射光的传播方向取决于这一点所在的波形,且反射光的方向由 $\theta - \varphi$ 表示。由(1) 式有

$$\frac{dY}{dx} = kA \sin(\omega t - kx)$$

由几何光学知:对于同一个入射点,当放射光线转 φ 角度时,其法线一定转 $\varphi/2$ 。对图 1(b) 所示入射点上

表面的斜率可表示为: $\frac{dY}{dx} = \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)$ 。所以有

$$\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = kA \sin(\omega t - kx) \quad (4)$$

这一表达式可用来描述任意点的波形, x 表示水平坐标。由此式可知, 最大的 φ 角 φ_{\max} 满足

$$\varphi_{\max} = 2\arctan(kA) \quad (5)$$

以上的讨论表明, 液体表面的表面声波导致了反射光束的干涉, 干涉条纹的角分离大小则依赖于表面波的波长, 而(5)式说明干涉条纹形成的区域必定在角 $(\theta - \varphi_{\max})$ 到角 $(\theta + \varphi_{\max})$ 之间的范围内。如果用 $\Delta\Phi$ 来定义这个角范围则

$$\Delta\Phi = 4\arctan(kA) \quad (6)$$

由(2)式可知在观察屏上会有干涉条纹, 从(6)式可知这些条纹必定被限制在给定区域。很容易根据实验数据计算出相邻条纹间隔相对于入射点的张角 $\Delta\varphi$ 以及整个干涉条纹相对于入射点的张角 $\Delta\Phi$, 将它们分别代入(3)式和(6)式, 则可得到表面声波的特性参数, 如波长、振幅。

下面讨论强度调制因子 $I_m(\varphi)$ 。如图 1 所示, 对于表面上对应的入射点, 反射光的方向由 $(\theta - \varphi)$ 表示。当表面振动时, 反射光线的方向角也随之变化。假定在 dt 时间范围内, 反射光线的方向角由 $(\theta - \varphi)$ 变化至 $(\theta - \varphi - d\varphi)$ 。若用 $I_m(\varphi)$ 表示该方向上的光强度, 则在此角度范围内的光通量为 $I_m(\varphi)d\varphi$ 。量子力学中在讨论谐振子的几率时曾假定: 振子某一区域出现的几率与它在该区域逗留的时间成正比^[12]。从数学模型的角度看, 完全可以把反射光在 $(\theta - \varphi)$ 至 $(\theta - \varphi - d\varphi)$ 区间内的光通量与量子力学中质点的几率类比。因此, 反射光强度与光在这个区域停留的时间成正比, 所以与强度调制因子相联系的表达式 $I_m(\varphi)$ 可表示为

$$I_m(\varphi)d\varphi = dt/T \quad (7)$$

这里, T 表示表面声波的周期, 结合(7)式与(4)式, 则 $I_m(\varphi)$ 可写为

$$I_m(\varphi) = \frac{1}{2T[d(\varphi/2)/dt]} = \frac{1}{4\pi[(kA)^2 - \tan^2(\varphi/2)]^{1/2}} \quad (8)$$

由(2)式和(8)式可以得到反射光强度解析式

$$I_r(\varphi) = \frac{1}{4\pi[(kA)^2 - \tan^2(\varphi/2)]^{1/2}} \times \cos^2\left\{\frac{\pi\Lambda}{\lambda}[\sin\theta - \sin(\theta - \varphi)]\right\} \quad (9)$$

式中的振荡因子 $\cos^2\left\{\frac{\pi\Lambda}{\lambda}[\sin\theta - \sin(\theta - \varphi)]\right\}$ 表示反射区域的干涉效应, 而干涉条纹又受调制因子 $\frac{1}{4\pi[(kA)^2 - \tan^2(\varphi/2)]^{1/2}}$ 调制。该调制因子有两个

极大点, 它们分别对应 $\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \pm kA$, 在这两个位置上反射光干涉条纹的强度最大。所以可以利用实验数据和方程(9)来确定表面波性质。

液体的色散关系可近似写为

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\gamma k^3}{\rho}\right) \quad (10)$$

式中 g 为重力加速度, γ 为表面张力, 而 ρ 为液体密度。忽略表面膜的高级色散影响, 解方程(10), 可得到液体动态表面张力。

4 实验结果

图 2 是观察到的液体表面波反射光的干涉图样, 其中(a), (b)分别对应表面声波频率为 19 Hz 和 25 Hz。由实验结果知, 干涉条纹的对比度非常高, 干涉条纹强度分布能明显地表现出光强度调制效应。反射光干涉图样强度分布在两边界位置达到极大, 形成了两个极亮点, 这两个极亮点对应反射光束的边界。它表明反射能量被限制在观察屏上确定的区域。通过对图样中相邻干涉条纹间距的分析, 可知条纹间距是表面声波频率的函数, 它随着表面声波频率的减小而减小。实际上可根据实验数据计算出相邻条纹间距及两个最亮点间的距离, 再利用(3)式和(6)式可得到表面声波的 k 和 A 两个参数。在我们的实验条件下, 对 19 Hz 和 25 Hz 的表面声波测得的波矢 k 和振幅 A 分别为 5.71 cm^{-1} , $10.92 \mu\text{m}$ 及 7.30 cm^{-1} , $7.92 \mu\text{m}$ 。利用实验数据和(10)式所示的色散关系, 可得到水的动态表面张力, 在这

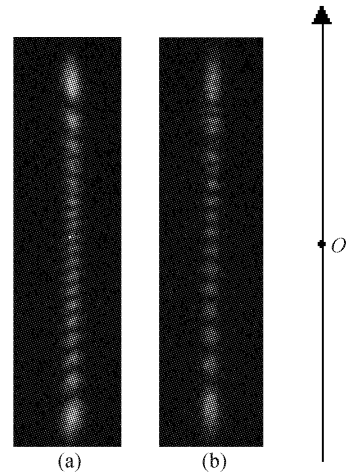


图 2 表面波干涉图样((a) 19 Hz; (b) 25 Hz)

Fig. 2 Modulated interference patterns from liquid watersurface with SAW at the frequencies of 19 Hz (a) and 25 Hz (b)

两种频率下分别为 34.3 mN/m 和 44.9 mN/m, 它与文献[11]中的测定值基本吻合。

过中点沿竖直方向对干涉图样 2(a) 进行线扫描, 得到如图 3(a) 所示的反射光强度轮廓, 图 3(a) 中的实线满足方程(9), 而虚点表示实验数据。对应的参数分别是频率 $\nu = 19$ Hz, 振幅 $A = 10.92 \mu\text{m}$, 表面波波长 $\Lambda = 11.0$ mm。将图 3(a) 中心附近部分放大后得到图 3(b)。对比图 3(a) 中的理论曲线和实验数据, 可以看出反射光强度在较大范围内被

调制, 反射光分布区间的两端对应光强度极大值, 理论调制因子与实验数据吻合程度很高。对比图 3(b) 中的强度振荡(实线)和实验数据(虚点), 可以看出理论分析与实验结果基本符合。同样, 对图 2(b) 的线扫描可以得到类似的结果, 该对比结果如图 4 所示。这不仅说明了表面波干涉现象的稳定性, 同时也说明了根据这一发现建立测量频率为几十赫兹的表面声波参数的可靠性。

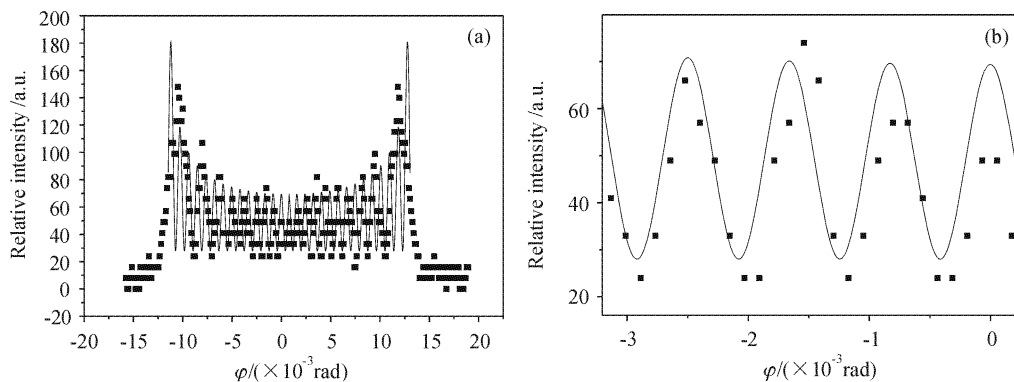


图 3 (a) 19 Hz 干涉图样的线扫描图(点)和理论曲线(实线);(b) 局部放大图

Fig. 3 (a) Cross section obtained from a line scan of the interference pattern of Fig. 2(a), the solid curve is a fit to Eq. (9) and dots are the experimental data; (b) A part of enlarged Fig. 2(a)

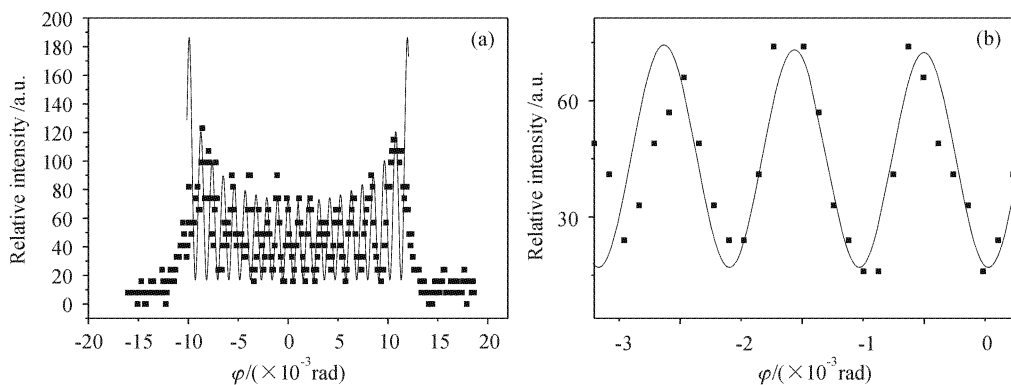


图 4 (a) 25 Hz 干涉图样的线扫描图(点)和理论曲线(实线);(b) 局部放大图

Fig. 4 (a) Cross section obtained from a line scan of the interference pattern of Fig. 2(b), the solid curve is a fit to Eq. (9) and dots are the experimental data; (b) A part of enlarged Fig. 2(b)

5 结 论

理论上导出了调制干涉图样光强度与表面声波之间的解析关系, 并与实验数据进行了对比。基于这一发现, 对于频率为几十微兹的液体表面声波, 提出了一种激光干涉测量方法, 理论上得到了液体表面波反射光的强度解析表达式, 该解析式中包括了表示干涉条纹的振荡函数和强度变化的调制因子。在实验中分别针对 19 Hz 和 25 Hz 的表面声波, 得

到了清晰的、稳定的被调制的干涉条纹。理论上, 由调制因子预计了反射光强度极大值的存在, 并且在实验上观察到了两个亮点, 这说明实验结果与理论完全吻合。通过测量反射光分布区间及相邻条纹间距, 可以测出液体表面波的波长、振幅及动态表面张力。基于这一发现, 又提出了一种适宜测量低频表面声波特性及表面张力的实用方法。无论被测液体透明还是不透明, 这一方法都适用。

参 考 文 献

- 1 S. Devolder, M. Wevers, D. De Meester. Thin layer thickness measurements based on the acousto-optic technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(12):1732~1734
- 2 R. Brier, O. Leroy, S. Devolder *et al.*. Surface roughness determination using the acousto-optic technique; theory and experiment [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(5):599~601
- 3 K. Yamanaka, H. Cho. Precise velocity measurement of surface acoustic waves on a bearing ball [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(19):2797~2799
- 4 D. A. Larson, T. D. Black, M. Green *et al.*. Optical modulation by a travelling surface acoustic wave and a holographic reference grating [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(9):1745~1750
- 5 B. D. Duncan. Visualization of surface acoustic waves by means of synchronous amplitude-modulated illumination [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(17):2888~2895
- 6 Miao Runcai, Yang Zongli. Physical properties of liquid surface wave and its optical effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 1996, **45**(9):1521~1525
- 7 Runcai Miao, Zongli Yang, Jingtao Zhu *et al.*. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **80**(17):3033~3035
- 8 P. H. Y. Lee, J. D. Barter, K. L. Beach *et al.*. Recent advance in ocean surface characterization by a scanning laser slope gauge [C]. in *Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurement*. L. Estep ed.. *SPIE*, 1992, **1749**:234~240
- 9 Q. Li, M. Zhao, S. Tang *et al.*. Two-dimensional scanning laser slope gauge: measurements of ocean-ripple structures [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **32**(24):4590~4597
- 10 J. D. Barter, P. H. Y. Lee. Real-time wave-amplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(15):1896~1898
- 11 J. D. Barter, P. H. Y. Lee. Imaging surface-wave analyzer for liquid surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12):2630~2635
- 12 Zhou Shixun. *Quantum Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1979. 38~44
周世勋. *量子力学教程*[M]. 北京:高等教育出版社, 1979. 38~44

聆听专家教诲 领略大师风采

“中国科学院光学设计高级讲习班”在上海举办



经中国科学院人事教育局批准,中国科学院上海光学精密机械研究所精心筹备的“中国科学院光学设计高级讲习班”于2004年5月10~17日在中国科学院上海光学精密机械研究所成功举办。来自全国光电行业的各大公司、企业和一些高校、研究所230多人参加了此次讲习班。

讲习班由知名光学专家王之江院士主讲。他主要讲解了光学设计和光学仪器发展史、光学系统的基本要求、高斯光学、像差理论、成像质量、各种不同的光学系统、光学设计软件的基本功能、光学设计实例等理论,并介绍了当前国内外光学设计技术的发展现状。中国科学院上海光学精密机械研究所所长朱健强研究员讲授了《光学设计的技术要点及其相关工艺问题》课程。此外,还邀请了两家软件公司作了光学软件应用介绍。

讲习班采取了授课和讨论相结合的互动方式,取得了很好的效果,代表普遍感觉收获很大。通过此次培训,学员们不仅学习了光学设计理论和实际操作技巧,同时更多地学习了大师的设计理念和思路。在授课间隙,中国科学院上海光学精密机械研究所还组织代表参观了该所的高功率激光联合实验室、强光光学重点实验室、光学薄膜中心等实验室和恒益公司的光学车间和装校车间。

据了解,此次光学设计高级讲习班举办期间恰逢中国科学院上海光学精密机械研究所建所四十周年所庆,该所把此项活动作为所庆系列学术活动月的一项重要活动进行了安排,所有讲课内容将被制作成DVD光盘发售。为了给光学设计人员提供更多学习和交流的机会,他们拟每年举办一次这样的活动,欢迎更多的光学设计人员参与交流和培训。(段家喜)

