

干涉法测量低频表面波的衰减系数*

苗润才^{1,2} 时 坚² 赵晓凤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, 西安 710062)

摘 要 对于频率为几十赫兹的低频衰减液体表面波, 结合激光干涉法和激光扫描法, 实验得到反衬度很高的调制干涉图样, 理论上给出了干涉图样的条纹宽度, 条纹分布范围与表面声波振幅之间的解析关系, 实时测量了液体表面波的衰减系数.

关键词 光干涉; 表面声波; 衰减系数

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

自六十年代激光问世以后, 激光就被用于研究表面声波(SAW)性质的测量. 对于高频 SAW, 绝大部分研究是建立在声波衍射效应的基础上. 根据声衍射原理, 如果 SAW 的频率较大, 则引起的衍射角分离较大, 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 SAW, 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 SAW, 通常采用激光表面波斜率扫描技术, 因为在这一频段, SAW 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得多, 因而不适用光衍射技术; 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, 对这一频段液体 SAW, 几乎没有人考虑用激光技术测量液体表面波, 也没有见到测量这一频段表面波衰减系数的报道. 虽然 Barter^[10,11] 曾采用透射成像技术分析过这些频率下的 SAW, 但在他的研究中, 液体必须染色, 这就是说他的方法不适用于水这样的透明液体. 本文基于几何光学的双光束干涉原理, 结合光的干涉技术和光的扫描技术, 研究几十赫兹频段的液体表面声波, 实验上得到清晰的调制干涉图样, 实时的测量表面波的衰减系数. 无论液体介质透明还是不透明, 这种方法均适用.

1 实验装置

实验装置图及实验原理如图 1, 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, 液体样品为普通的蒸馏水. He-Ne

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, 光斑大约照亮两到三个波形. 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 7.95 mm × 6.45 mm, S/N 超过 48 dB.

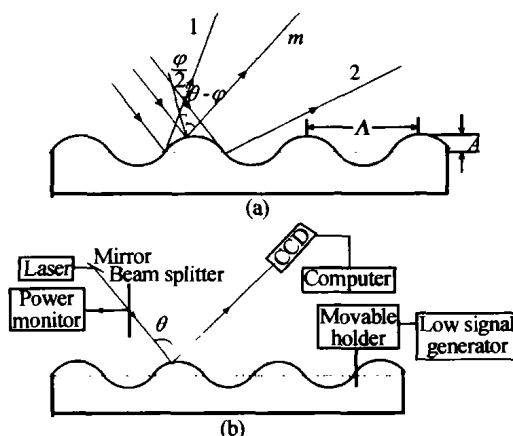


图 1 (a) 实验原理图; (b) 实验装置图
Fig. 1 (a) Reflection from the surface with tens Hertz frequencies wave; (b) Schematic diagram of the experimental setup

2 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, 通常把这种运动近似为正弦波. 因此, 表面波波函数可写为

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

*教育部骨干教师基金资助项目(200065)

Tel: 0912-3894603 Email: rcjmiao@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-12-30

这里 Y 为横向坐标, x 是沿波传播方向的坐标, A 是 SAW 振幅, ω 是 SAW 频率, k 是波矢量, 且 $k = 2\pi/\Lambda$, Λ 是 SAW 波长. 若液体表面波为几十赫兹的频率, 未扩束的激光束照射在液体表面波上, 假定沿波传播方向上光斑的长轴刚好包括两个 SAW 波长, 入射的激光, 经这两个波面反射后在远场叠加而发生干涉, 出现干涉条纹. 现在考虑这两个 SAW 波面的反射光所形成的干涉条纹的分布. 如图 1(a), 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. 因为这两点对应的波的斜率相同, 所以两束反射光以相同方向传播. 假定这束反射光束与竖直方向上的夹角为 $\theta - \varphi$. 由于光速远大于 SAW 波速, 且波的衰减较小, 则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 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

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

这里, $I_r(\varphi)$ 表示反射光强度是 φ 的函数, φ 是干涉图样中某一干涉亮纹到中心亮纹的角宽度, λ 是光波波长, θ 表示光的入射方向, $\theta - \varphi$ 表示反射方向. 由式(2)可知, 在远场观察面上会有干涉条纹. 相邻条纹间距相对于入射点的张角 $\Delta\varphi$ 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)有

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

由几何光学知: 对于同一个入射点, 当反射光线转 φ 角度时, 其法线一定转 $\frac{\varphi}{2}$. 对图 1(a) 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 SAW 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, 而式(5)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

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

由式(2)可知在观察屏上会有干涉条纹, 由式(6)可知这些条纹必定被限制在给定区域. 实验上测量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 $\Delta\Phi$, 把这些数据及入射光波波长 λ 和入射角 θ 分别代入式(3)和式(6), 很容易计算出表面声波的特性参数, 如波长、振幅.

3 实验结果

图 1(a), (b) 是实验的原理图和实验装置图, 用未扩束的激光束直接照射液体表面波, 反射光束在远场形成干涉图样, 结果如图 2, 其中(a)、(b)分别对应 SAW 频率为 19 Hz 和 25 Hz. 由实验结果看, 干涉条纹的对比度非常高. 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 SAW 频率的函数, 它随着 SAW 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, 再利用式(3)和式(6)可得到 SAW 的波矢 k 和振幅 A 两个参数.

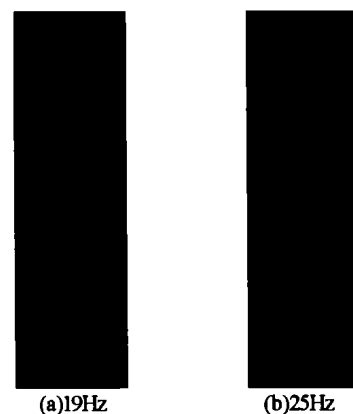


图 2 SAW 反射光场的干涉图样
Fig. 2 Modulated interference patterns from liquid water surface

对于频率在 15 ~ 100 Hz 的低频液体表面波, 低频液体表面波的波长在 11 ~ 4 mm 间变化, 通过调整入射角从而调整入射到水面椭圆光斑的长轴长度, 使得入射光照射液体表面波两到三个波长, 从而满足双光束干涉原理. 调节激发器水平位置旋钮, 改变入射光束到激发波源之间的距离, 测量不同距离处的反射光干涉图样, 并计算出相应的波矢 k 和

振幅 A 。实验上每隔 0.5 cm 的距离测量一幅干涉图,并计算出相应的表面波振幅,然后以振幅数据为纵坐标,以距振源的距离为横坐标,用最小二乘法得到表面波振幅随距离的变化曲线,结果如图 3,其中 (a)、(b) 分别对应 SAW 频率为 19 Hz 和 25 Hz。由图 3 的实验结果可以看出:无论是频率为 19 Hz 还是频率为 25 Hz 的液体表面波,波的振幅随传播距离的增大而减小,也就是说,表面波为衰减波,与体相水波的衰减速度相比,表面水波的衰减非常大。

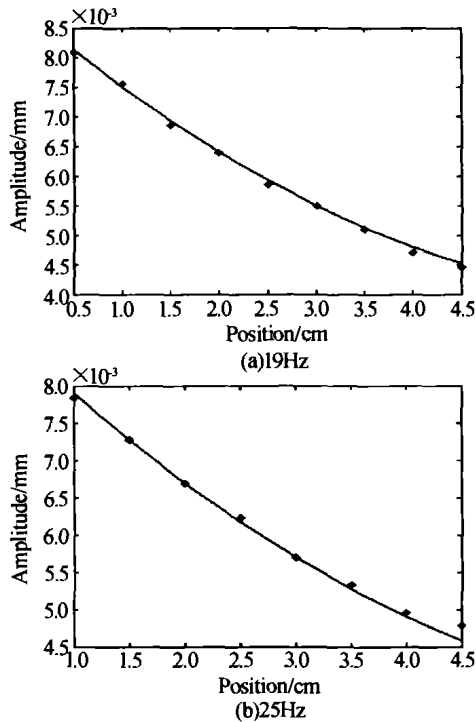


图 3 表面波振幅随距离的变化关系
Fig. 3 The dependence of the SAW amplitude on the distance from the wave source

为了便于观察表面波的衰减特性,先将图 3 中的振幅数据扩大 10 倍再取以 e 为底的对数值,然后以这些对数值为纵坐标,仍然以波传播距离为横坐标画图,其结果如图 4。由图 4 可以看出:无论是频率为 19 Hz 还是频率为 25 Hz,振幅的自然对数值随波传播距离的变化都是直线型,也就是说表面波的衰减规律是标准的指数型衰减。若波的频率不同,衰减系数的大小不同,频率越大,衰减系数越小。在我们的实验条件下,分别测的 19 Hz 水表面波的衰减系数是 $0.1518 \pm 0.0133 \text{ cm}^{-1}$ 、25 Hz 表面波的衰减系数是 $0.1466 \pm 0.0139 \text{ cm}^{-1}$ 。

用同样的方法,我们还测量了 35 Hz, 50 Hz, 70 Hz 时液体表面波的衰减系数分别为 $0.1406 \pm 0.0134 \text{ cm}^{-1}$, $0.1336 \pm 0.0133 \text{ cm}^{-1}$, $0.1254 \pm 0.0137 \text{ cm}^{-1}$ 。

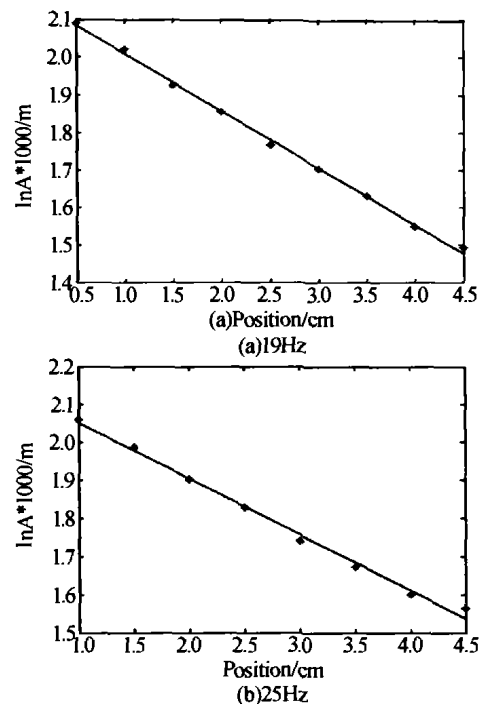


图 4 表面波振幅的对数值随距离的变化关系
Fig. 4 The logarithm of the SAW amplitude versus the distance from the wave source

4 结论

通过激光干涉技术和激光扫描技术,针对几十赫兹频段的液体表面声波,实验上得到反衬度很高的干涉图样。理论上给出了干涉图样条纹宽度、条纹分布范围与表面声波振幅之间的解析关系。基于这一发现,对于频率为几十赫兹的液体表面衰减声波,提出了一种激光干涉测量方法测量波的衰减系数。当液体表面波的频率超过 100 Hz 时,我们正在用衍射法测量表面波的衰减系数。与体相水波的衰减系数相比,表面水波的衰减非常大;表面波的衰减规律是标准的指数型衰减;当波的频率不同,衰减系数的大小不同,频率越大,衰减系数越小。

参考文献

- 1 Devolder S, Wevers M, DeMeester D. Thin layer thickness measurements based on the acoustic-optic technique. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(12): 1732 ~ 1734
- 2 Brier R, Leroy O. Surface roughness determination using the acoustic-optic technique: theory and experiment *Appl Phys Lett*, 1997, **75**(5): 599 ~ 601
- 3 Yamanaka K, Cho H. Precise velocity measurement of surface acoustic waves on bearing ball. *Appl Phys Lett*, 2000, **76**(19): 2797 ~ 2799
- 4 Larson D A, Black T D, Green M, et al. Optical modulation by a traveling surface acoustic wave and a holographic reference grating. *J Opt Soc Am*, 1990, **A7**(9): 1745 ~ 1750

- 5 Duncan B D. Visualization of surface acoustic waves by means of synchronous amplitude-modulated illumination. *Appl Opt*, 2000, **39**(17):2888 ~ 2895
- 6 Miao Runcai, Yang Zongli. Physical properties of liquid surface wave and its optical effect. *Physica Acta*, 1996, **46**(9):1521 ~ 1525
- 7 Miao Runcai, Yang Zongli, Zhu Jingtiao, *et al.* Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction. *Appl Phys Lett*, 2000, **80**(17):3033 ~ 3035
- 8 Lee PHY, Barter J D, Beach K L, *et al.* Recent advance in ocean-surface characterization by a scanning-laser slope gauge, in *Optics of the Air - Sea Interface: Theory and Measurement*, L. Estep, ed., *Proc SPIE*, 1992, **1749**(11): 234 ~ 224
- 9 Li Q, Zhao M, Tang S, *et al.* Two-dimensional scanning laser slope gauge: measurements of ocean-ripple structures. *Appl Opt*, 1988, **32**(24):620 ~ 625
- 10 Barter J D, Lee PHY. Real-time waveamplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces. *Appl Phys Lett*, 1994, **64**(15): 1896 ~ 1898
- 11 Barter J D, Lee PHY. Imaging surface-wave analyzer for liquid surfaces. *Appl Opt*, 1997, **36**(12): 2630 ~ 2635
- 12 Zhou Shixun. *Quantum Mechanics*, Beijing, Higher Education Press, 1979. 38 ~ 44

Determination of the Attenuation Coefficient of Surface Acoustic Wave by Means of the Light Interference

Miao Runcai^{1,2}, Shi Jian¹, Zhao Xiaofeng¹

¹ Department of Physics, Yulin College, Shaanxi Yulin 719000

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

Received date: 2003-12-30

Abstract A practicable method for liquid-surface acoustic-wave at the frequencies of a few tens Hertz, based on the combination of optical interference and scanning wave slope, has been developed. Moreover, this technique was used to determine the attenuation coefficient of the surface wave at these frequencies in real time.

Keywords Light Interference; Surface acoustic-waves; Attenuation coefficient



Miao Runcai was born in 1957. He graduated from the Department of Physics Shaanxi Normal University in 1984 and obtained Master Degree. In 1997, he got his Ph. D. from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His research interests include transient optics and optical measurement.