

文章编号: 1001-3806(2007)06-0584-03

## 低频液体表面波的光衍射及衰减特性的研究

罗道斌<sup>1</sup>, 苗润才<sup>2</sup>, 刘香莲<sup>2</sup>, 朱峰<sup>3</sup>

(1. 陕西科技大学理学院, 西安 710021; 2. 榆林学院物理与电气工程系, 榆林 719000; 3. 陕西师范大学物理学与信息科技学院, 西安 710062)

**摘要:** 为了研究液体表面波的衰减特性, 采用激光衍射法, 对液体表面波的振幅和传播距离之间的关系进行了实验取证和理论分析。实验结果表明, 液体表面波的振幅随传播距离的增大而按指数型规律减小, 并具有明显的色散效应, 衰减系数随频率线性增大。这一结果对液体表面波的检测和应用是有价值的。

**关键词:** 激光技术; 衰减系数; 衍射; 表面波

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A

### Study on diffraction and damping characteristics of low frequency liquid surface waves

LUO Dao-bin<sup>1</sup>, MIAO Run-cai<sup>2</sup>, LIU xiang-lian<sup>2</sup>, ZHU Feng<sup>3</sup>

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

**Abstract** In order to study the damping characteristics of the liquid surface waves, the relation between the liquid surface wave amplitude and the spreading distance was testified experimentally and analyzed theoretically by means of laser diffraction. The experimental results indicated that the liquid surface wave amplitude declined exponentially with the spreading distance and the damping coefficient which varied linearly with frequency has dispersive characteristics. The conclusion is valuable for liquid surface wave detecting and application.

**Key words** laser technique; damping coefficient; diffraction; surface waves

### 引 言

自上世纪 60 年代激光问世以后, 激光就被用于研究表面波性质。对于高频的表面波, 绝大部分研究是建立在声波光衍射的基础上。根据声光衍射原理, 如果表面波的频率越大, 则引起的衍射光角分离越大, 所以这类实验大多针对超声表面波进行<sup>[1-3]</sup>。1979 年, WEISBUCH 等首次观察到液体表面波的光衍射现象, 并以此建立了表面张力的光学测量方法<sup>[4]</sup>。对于低频液体表面波, 作者曾进行过专门的研究。在这些研究中, 将激光衍射法的表面波频率下延到几百赫兹<sup>[5]</sup>。对于几十赫兹频率的液体表面波, 作者曾经建立了光学干涉法, 并用这种方法测量液体表面波及表面特性<sup>[6]</sup>。

衰减是液体表面波的重要特性, 通常用衰减系数

来描述波的衰减特性。衰减系数的测量方法有多种多样, 其中光学方法是一种较好的无损测量方法。由于受传统声光方法的局限, 相比较而言, 对这方面的研究大多集中在超声表面波波段。对低频的液体表面波的研究相对较少。BEHROOZI 等曾经采用激光光纤干涉仪测量表面波的衰减系数<sup>[7]</sup>, 这种办法具有一定的优点。但相对而言, 该方法所用的光纤干涉仪成本较高, 且干涉仪相对表面位置的定位精度要求较高。LEE 等人结合光外差技术、声光调制技术和光谱技术测量表面波的空间衰减特性<sup>[8]</sup>。这种方法虽然能成功的测量衰减系数, 但测量设备和测量过程相对复杂。BARTER 等采用透射成像技术研究表面波的衰减<sup>[9]</sup>。虽然该方法相对简单, 但测量中, 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。基于低频液体表面波的光衍射效应, 作者提出了一种非接触式测量表面波衰减系数的光学方法。文中系统地论述了测量理论, 并给出了衰减系数与衍射光强的解析关系。实验上观察到高清晰的低频液体表面波激光衍射条纹, 讨论了由衍射条纹测量衰减系数的具体过程, 给出了测量结果。该方法具有实时、非接触、简单实用的特点。

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2003A12)

作者简介: 罗道斌 (1980), 男, 硕士, 主要从事激光检测方面的研究工作。

E-mail: luodaobin@sust.edu.cn

收稿日期: 2006-08-03; 收到修改稿日期: 2006-11-28

### 1 实验装置

实验装置图见图 1, 低频信号发生器的输出驱动

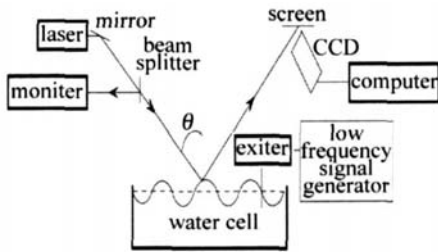


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

表面波激发器, 信号发生器的输出频率在几十赫兹频段, 表面波激发器在液体表面上产生表面波, 在这频段的表面波的振幅非常小 (微米级)。液体样品为蒸馏水。He-Ne 激光束被分束器分为两束, 一束用光能量测试仪来监控激光输出的稳定度, 另一束直接照射到表面波上。实验中入射角  $\theta = 1.45 \text{ rad}$  激光的波长为  $632.8 \text{ nm}$ 。液体样品池放在一个可以调节位置的金属板上, 表面波激发器固定在一个可以调节位置的支架上, 这样可以调节波源和入射点间的距离。入射光点与观察屏间的距离约  $9.7 \text{ m}$ 。在观察屏上可以看到清晰的衍射图样, 用 CCD 采集衍射图样, 并将数据输入计算机, 在计算机上可以显示, 存储, 处理衍射图样。

### 2 理论分析

虽然实际上液体表面粒子的运动较为复杂, 但在振幅不太大时, 通常把这种运动近似为正弦波, 可写为:

$$y = h \sin(\omega t - kx) \quad (1)$$

式中,  $y$  为纵坐标, 表示表面波的振动方向,  $x$  为横坐标, 表示表面波的传播方向,  $h$  为表面波的振幅,  $\omega$  为表面波的角频率,  $t$  为表面波传播时间,  $k$  为波矢量, 且  $k = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  为表面波的波长。

如图 2 所示, 激光束斜照射到表面波上, 液体表面波对入射光波的位相进行调制, 即液体表面波对入射

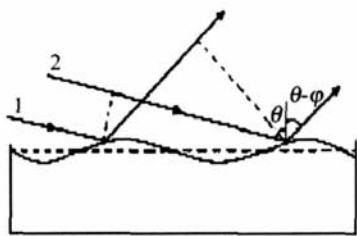


Fig 2 Principle diagram of the experiment

光可看成位相型光栅。图中  $\theta$  为入射角,  $\theta - \varphi$  为衍射角。在斜入射情况下, 受表面波调制后的光场分布为<sup>[10]</sup>:

$$u(x) = \exp\left[ j \frac{4\pi h \cos\theta}{\lambda} \sin\left(\omega t - \frac{kx}{\cos\theta}\right) \right] \text{rect}(x/L) \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为入射激光波长,  $L$  为激光光斑的宽度。

由于实验上入射点到观察屏的距离远大于入射光斑的宽度, 此衍射可近似为夫朗和费衍射, 或者说观察屏上的光场分布是表面波调制后光场的傅里叶变换。令  $\beta = 4\pi h \cos\theta / \lambda$  并利用恒等式  $\exp[j\beta \sin(\Psi)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(jn\Psi)$ ,  $\Psi$  为任意变量, 对 (2) 式进行傅里叶变换, 可得到表面波衍射场的分布为:

$$A(x') = \frac{\exp[j\pi(2d^2 + x'^2)/2d\lambda]}{j\lambda d} \times L \sum_n J_n(\beta) \text{sinc}\left[ L \left( \frac{x'}{\lambda d} - \frac{n}{\Lambda \cos\theta} \right) \right] \quad (3)$$

于是衍射区光的相对强表达式为:

$$I(x') = \sum_n J_n^2(4\pi h \cos\theta / \lambda) \text{sinc}^2\left[ L \left( \frac{x'}{\lambda d} - \frac{n}{\Lambda \cos\theta} \right) \right] \quad (4)$$

式中,  $J_n$  是  $n$  阶第一类贝塞尔函数,  $n$  为整数,  $\text{sinc}(x)$  为特殊函数,  $x'$  为衍射光点在观察屏上的坐标,  $d$  为入射点到观察屏的距离。

式中, 因子  $J_n^2(4\pi h \cos\theta / \lambda)$  为第  $n$  级衍射条纹的相对强度, 对于给定的入射角  $\theta$  和激光波长  $\lambda$  该强度是表面波振幅  $h$  的函数; 因子  $\text{sinc}^2\left[ L \left( \frac{x'}{\lambda d} - \frac{n}{\Lambda \cos\theta} \right) \right]$  描述了  $n$  级衍射条纹的位置及形状, 由此可知, 表面波波长确定了条纹的空间分布。

根据贝塞尔函数, 通过任一级衍射光和零级衍射光强度的比值, 可计算出对应的表面波振幅。对于给定的表面波激发源, 改变激发源到入射光点的距离, 根据上述计算表面波振幅的方法, 可以得到相应点上的表面波振幅, 这样就能获得表面波振幅随传播距离的关系, 进而得到衰减系数。

### 3 实验结果

按照图 1 所示的实验装置, 选择合适的入射角  $\theta$  和观察距离  $d$ , 调节表面波激发器的输入功率, 以便在观察屏上出现清晰的衍射条纹。实验中, 用未扩束的激光束直接照射表面波, 表面波频率在  $5 \text{ Hz} \sim 9 \text{ Hz}$  之间。图 3 给出了表面波频率为  $60 \text{ Hz}$  时的衍射图样,

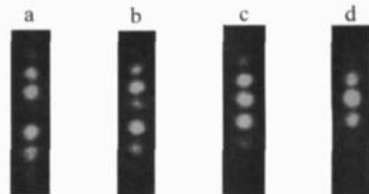


Fig 3 Diffraction patterns at the frequency of 60Hz

其中图 3a~ 图 3d 分别对应表面波不同传播距离处的衍射图样。实验中先选一个合适的传播距离, 得到相应的衍射图样 (见图 3a), 然后再通过调整激发器水平位置, 改变波源与入射光点的距离, 使该距离逐渐增

加, 每调整 10mm 测量一次, 得到了相应的衍射图样 (见图 3b~图 3d)。由图 3可以看出, 衍射条纹非常清晰, 其对比度很高。且在波源的输入功率不变时, 对于表面波不同的传播距离, 衍射条纹的强度分布不同。这说明表面波振幅随传播距离变化。

定义  $C_{10} = I_1 / I_0 = J_1^2(\beta) / J_0^2(\beta)$  为一级条纹强度和零级条纹强度极的比值,  $C_{20} = I_2 / I_0 = J_2^2(\beta) / J_0^2(\beta)$  为二级条纹和零级条纹的强度比值。实验中可直接测得强度比值  $C_{10}, C_{20}$ , 然后根据贝塞耳函数的性质, 输入参数  $\lambda$  和  $Q$  用计算机可直接得到该入射点表面波振幅  $h$ 。实验中观察到了零级缺级现象, 如图 3a所示, 缺级的原因是  $J_0(\beta) = 0$ 。通过贝塞耳函数的性质, 可直接求出缺级时表面波的振幅, 图 3a对应的振幅值为  $2.316 \mu\text{m}$ 。

改变入射点到波源间距离, 测量相应的衍射图样, 分析衍射图样获得对应点上表面波振幅, 进而得到波面振幅随传播距离的变化关系。图 4中给出了频率

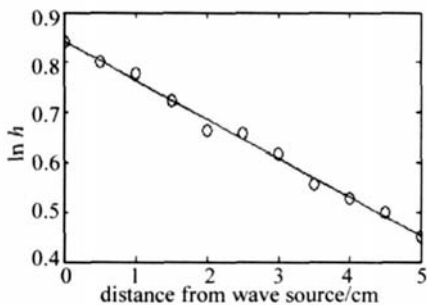


Fig 4 Logarithm of amplitude versus the distance from the wave source

为 60Hz 时, 表面波振幅随传播距离的变化关系, 其中纵坐标为表面波振幅的自然对数值, 横坐标为波传播距离。图中的圆圈表示实际的测量值, 测量时入射点沿波传播方向每移动 5mm 取样 1 次。用最小二乘法拟和曲线, 如图中的实线所示。从图可以看出: 传播距离增大时, 表面波振幅减小, 且振幅的自然对数值随传播距离线性变化。这说明表面波传播时明显衰减, 且是指数型衰减的, 衰减系数的大小等于图 4 中直线的斜率。

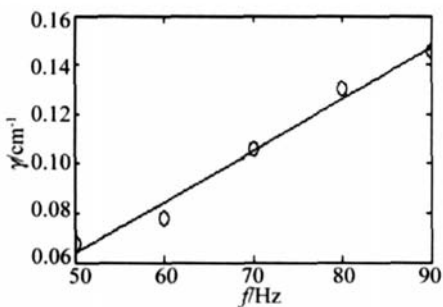


Fig 5 Damping coefficient versus the frequency

以衰减系数  $\gamma$  为纵坐标, 频率  $f$  为横坐标, 由最小二乘法拟和曲线, 得到衰减系数随频率的变化关系, 结果如图 5 所示。由图可见: 表面波的衰减系数具有明显的色散效应, 频率越大时, 衰减系数越大。对回归方程的 F 检验, 衰减系数与频率满足线性关系。

## 4 结 论

对于频率为几十赫兹的液体表面波, 用激光束直接照射波面, 实验上观察到稳定、清晰的激光衍射图样, 衍射图样具有非常高的反衬度, 并观察到零级缺级现象。理论上分析了表面波的光衍射效应, 得到了衍射光场的解析表达式, 给出了衍射光强度与表面波振幅的关系及衍射条纹分布与表面波波长的关系。理论上解释了衍射条纹零级缺级现象。基于表面波光衍射效应, 建立了表面波衰减特性的检测方法和实验装置, 给出了具体的测量过程。该方法具有实时、无损和简单实用的特点。实验发现, 表面波具有明显衰减效应, 衰减满足指数型规律, 并具有明显的色散效应, 衰减系数随频率线性增大。

## 参 考 文 献

- [1] YAMANAKA K, CHO H. Precise velocity measurement of surface acoustic waves on a bearing ball [J]. *A P L*, 2000, 76(19): 2797~2799
- [2] DUNCAN B D. Visualization of surface acoustic waves by means of synchronous amplitude modulated illumination [J]. *Appl Opt* 2000, 39(17): 2888~2895.
- [3] ZHOU Y, WU L, LIU Y Zh. Analysis and numerical calculation of mode conversion efficiency in collinear acousto-optic interaction [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 412~414 (in Chinese).
- [4] WEISBUCH G, GARBAY F. Light scattering by surface tension waves [J]. *Amer J Phys* 1979, 47(4): 355~356.
- [5] MIAO R C, YANG Z L, ZHU J T. Visualization of kw-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction [J]. *A P L*, 2002, 80(17): 3033~3035
- [6] MIAO R C, ZHAO X F, SHI J. Modulated interference of reflected light from liquid wave at tens hertz frequencies [J]. *Opt Commun* 2006, 259: 592~597.
- [7] BEHROOZIE, LAMBERT B, BUHROW B. Direct measurement of the attenuation of capillary waves by laser interferometry. Noncontact determination of viscosity [J]. *A P L*, 2001, 78(16): 2399~2401
- [8] LEE K Y, CHOU T, CHUNG D S. Direct measurement of the spatial damping of capillary waves at liquid vapor interfaces [J]. *Physics and Chemistry*, 1993, 97: 12876~12878
- [9] BARTER J D, LEE P H Y. Real time wave amplitude spectrum analyzer for air liquid interfaces [J]. *A P L*, 1994, 64(15): 1896~1898.
- [10] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics [M]. New York: McGraw-Hill 1968, 69~71.