文章编号:1002-2082(2010)01-0288-04

液体表面波及其谐波的光衍射效应

罗道斌，侯瑞宁，汤 锋
(陕西科技大学 理学院，西安 710021)

摘 要：为了探究液体表面波的波动规律，提出了一种基于激光衍射的探测方法。未扩束的激光束直接斜入射到波动液面，液面波动的强度由电磁式激发器控制、频率由信号发生器控制，用CCD采集光衍射图样并传送到计算机中实时处理。根据波动光学理论，给出了衍射光场和液体表面波之间的解析关系，发现实验现象和理论分析吻合。实验结果表明：该方法具有实时、准确、无损的特点。

关键词：光衍射；液体表面波；声光作用
中图分类号：TN241；O436.1 **文献标志码**：A

Light diffraction effect from liquid surface wave and its higher harmonic wave

LUO Dao-bin，HOU Rui-ning，TANG Feng
(College of Science，Shaanxi University of Science & Technology，Xi'an 710021，China)

Abstract：A method of detecting liquid surface wave based on laser diffraction was proposed. A He-Ne laser beam was obliquely incident upon liquid surface wave directly，the wave intensity was controlled by an electromagnetic type exciter and the frequency of the liquid wave was controlled by a signal generator，the laser diffraction patterns from liquid surface waves were collected by a charge-coupled device. The dependence of the diffracted field on the surface waves was derived by theory of wave optics. The experiment result indicates that the proposed method has the advantages of high sensitivity，high speed and non-destructive.

Key words：light diffraction；liquid surface wave；acousto-optic interaction

引言

声光衍射技术是一种重要的探测方法，通过在固体表面上采用超声波获得声光衍射[1-3]。声光衍射技术日趋成熟，广泛应用于各种探测测量，包括固体和液体表面的探测与测量[4-8]。由于液体表面波动复杂性与不稳定性，利用声光技术探测液体表面波的研究相对较少，文献[9]提出了液体表面谐波光衍射的可能性，并用拟合曲线的方法得到图样，但是效果并不明显。为寻求一种准确、快速的方法来探测液体表面波波长、振幅、频率和液体的表面张力之间的关系，我们利用激光衍射技术对不同频段的液体表面波进行了实验研究，实现了表面波及其谐波的光衍射效应，得到液面波动光衍射的光场分布与表面波参数之间的关系。这为探测液体的表面张力及研究表面活性剂的特性提供了一种光学方法。

1 实验装置与实验现象

实验装置如图1所示，它由4部分组成：样品池及液体样品；液体表面激发系统，包括信号发生器、

收稿日期：2009-09-01； **修回日期**：2009-10-29
基金项目：陕西科技大学自然科学基金资助项目(ZX09-39)
作者简介：罗道斌(1980－)，男，讲师，研究生，主要从事光学测量研究工作。E-mail：luodaobin@sust.edu.cn

电磁式表面波激发器、放大电路等;光源及光学系统;图像采集与数据处理系统。信号发生器经放大电路驱动表面波激发器,激发器在液体表面形成波动,表面波激发器的输出功率可以调节,以此来控制液体表面波的振幅,且激发器安装在三维可移动的支架上,可以调节表面波波源和激光入射点之间的距离以及液面波激发的深度。He-Ne 激光束直接斜入射到液体表面上。由于液面的波动,入射到液面的光束发生衍射效应,用面阵电荷耦合器件(面阵CCD)采集光衍射图样,并将数据通过采集卡输入计算机中存储和处理。实验中He-Ne 激光的波长 $\lambda=632.8$ nm,入射角 $\theta=1.47$ rad,液体样品为蒸馏水。

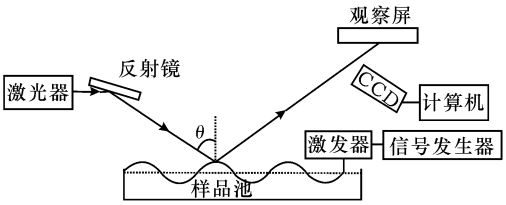

图1　实验装置图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental setup

调整激发器的输出功率,在远场光衍射区可采集到稳定、清晰的光衍射图样,如图 2 所示。图 2(a),图 2(b),图 2(c),图 2(d)显示表面波激发频率分别为19 Hz,25 Hz,60 Hz 和120 Hz,从图中可以看出图 2(a)和图 2(b)的衍射图样和图 2(c)与图2(d)的衍射图样有着较大差别。下面根据声光衍射理论分析这一实验现象。

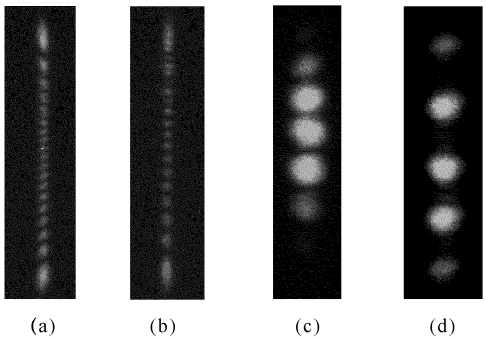

图2　光衍射图样

Fig. 2　Diffraction patterns at the frequency of 19 Hz,25 Hz,60 Hz and 120 Hz

2　液体表面波的声光衍射理论分析

激光束斜入射到波动液面后,经液面反射后,反射光束的位相受表面波的调制,波动液面相当于一块反射式位相型光栅。考虑到液体波动的高阶谐波,在光束斜入射的情况下,反射光的位相可以写成

$$\varphi(x)=\frac{2\pi}{\lambda}\sum_m[2h_m\cos\theta\sin(k_m x/\cos\theta)] \tag{1}$$

式中:h_m 为表面波中 m 次谐波的振幅;θ 是光束的入射角;λ 是光波波长;x 是波传播方向上的坐标;k_m 是 m 次谐波的波矢量,且 $k_m=2\pi/\Lambda_m$,Λ_m 是 m 次谐波波长。根据傅里叶光学,物函数可写成:

$$u(x)=\exp\{\frac{\mathrm{j}4\pi\cos\theta}{\lambda}[\sum_m h_m\cos\theta\sin(k_m x/\cos\theta)]\}\mathrm{rect}(x/l_x)\mathrm{rect}(y/l_y) \tag{2}$$

式中:$\mathrm{rect}(x/l_x)\mathrm{rect}(y/l_y)$表示入射到液面激光光斑的大小;$x$ 方向表示沿着液面波动传播方向。

定义 $\beta_m=\frac{4\pi h_m\cos\theta}{\lambda}$,根据 $\exp[\mathrm{j}\beta\sin(\Psi)]=\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta)\exp(\mathrm{j}n\Psi)$,(2)式可改写成:

$$u(x)=\{\sum_m\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta_m)\exp(\mathrm{j}nk_m x/\cos\theta)\}\cdot\mathrm{rect}(x/l_x)\mathrm{rect}(y/l_y) \tag{3}$$

式中:J_n 表示n 阶第一类贝塞尔函数,对上式进行傅里叶变换,得到远场衍射区的光振动[10]

$$A(x')=\frac{\exp[\mathrm{j}\pi(2z^2+x'^2)/2z\lambda]}{j\lambda z}l_x l_y\cdot\sum_m\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta_m)\mathrm{sinc}[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-\frac{n}{\Lambda_m\cos\theta})]\mathrm{sinc}(\frac{l_y y'}{\lambda z})$$

式中:z 为激光束入射点到观察屏之间的距离;x'和 y'为观察屏上的坐标。在只考虑一维的情况下,根据(4)式展开可以得到:

基波衍射

$$A_1(x')=\frac{\exp[\mathrm{j}\pi(2z^2+x'^2)/2z\lambda]}{j\lambda z}l_x l_y\sum_n J_n(\beta_1)\cdot\mathrm{sinc}[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-\frac{n}{\Lambda_1\cos\theta})]$$

二次谐波衍射

$$A_2(x')=\frac{\exp[\mathrm{j}\pi(2z^2+x'^2)/2z\lambda]}{\mathrm{j}\lambda z}l_x l_y\sum_n J_n(\beta_2)\cdot\mathrm{sinc}[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-\frac{n}{\Lambda_2\cos\theta})]$$

m 次谐波衍射

$$A_m(x')=\frac{\exp[\mathrm{j}\pi(2z^2+x'^2)/2z\lambda]}{\mathrm{j}\lambda z}l_x l_y\sum_n J_n(\beta_m)\cdot\mathrm{sinc}[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-\frac{n}{\Lambda_m\cos\theta})]$$

综合上述分析,衍射极大值位置由$\mathrm{sinc}[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-$

$\frac{n}{\Lambda_m\cos\theta}$)决定,即衍射极大值位置与液体表面波波长$\Lambda_m$有关,而衍射极大值的强度由$J_n(\beta_m)$决定,即衍射光强极大值与液体表面波的振幅$h_m$相关。当表面波振幅满足$J_n^2(\beta_m)=0$时,该衍射级缺级。如图3所示。实验中观察到的60 Hz表面波的零级缺级,即表面波振幅满足$J_0^2(\beta_1)=0$,$\beta_1=\frac{4\pi h_1\cos\theta}{\lambda}$,零级缺级。

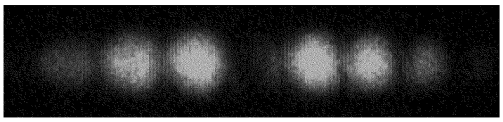

图3　零级缺级衍射图样

Fig. 3　Diffraction patterns at disappearance of zero fringe

当表面波动的高次谐波的振幅足够小时,忽略高次谐波的衍射,只考虑基波声光衍射,(4)式可以写成:

$$A(x')=\frac{\exp[j\pi(2z^2+x'^2)/2z\lambda]}{j\lambda z}l_xl_y\sum_n J_n(\beta_1)\cdot\mathrm{sinc}[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-\frac{n}{\Lambda_1\cos\theta})] \tag{5}$$

如果$\frac{1}{\Lambda_1}\gg\frac{2}{l_x}$,那么各个衍射项之间的交叠项可以忽略,相应的衍射强度可表示为

$$I(x')=(\frac{l_xl_y}{\lambda z})^2\sum J_n^2(\beta_1)\mathrm{sinc}^2[l_x(\frac{x'}{\lambda z}-\frac{n}{\Lambda_1\cos\theta})] \tag{6}$$

衍射极大值出现的空间位置,$x'=\frac{n\lambda z}{\Lambda_1\cos\theta}$由表面波波长决定,而衍射极大值强度由$J_n^2(\beta_1)$确定,即表面波的振幅决定衍射级的强度。

根据衍射图样图2(b)和图2(c),我们得到衍射图样的截面图,如图4所示。图4中,图4(a)对应图2(b),图4(b)对应图2(c)。

由(4)式和(6)式可知,衍射极大值和表面波的波长相关,$x'=\frac{n\lambda z}{\Lambda_m\cos\theta}$,液面波$m$次谐波的光衍射条纹相邻极大值之间的距离$\Delta x'=\frac{n\lambda z}{\Lambda_m\cos\theta}$。图4(a)观察到的衍射级次比较多,衍射极大值之间的距离并不恒定,是基波和谐波共同光衍射的结果,由于基波和谐波的波长不相等,所以极大值之间的距离也不相等。而图4(b)极大值能观察到的衍射级次较少,且距离几乎保持恒定,未能看出谐波衍射的效果,只有基波的衍射图样;那是因为在频率较高的情况下,谐波的振幅非常微小,谐波衍射的极大值强度非常小,$J_n(\beta_m)\approx0$,以至于观察不到高次谐波的衍射效应。表面波衍射的理论分析与图4的实验结果吻合。

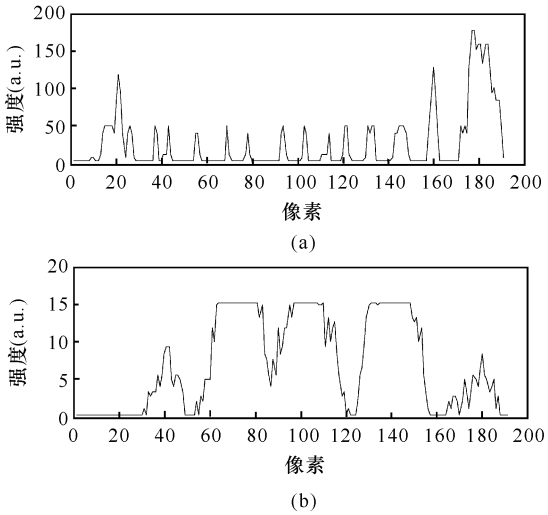

图4　衍射图样截面图

Fig. 4　Diffraction figure of intersection

3　结束语

液体表面波相当于一块位相型光栅,激光束斜入射到波动液面上,实现了光衍射,得到了稳定清晰的衍射图样,并观察到衍射缺级现象。理论分析得出衍射光场和液体表面波之间的解析关系,衍射光场蕴含液体表面的信息。这为探测液体的表面张力及研究表面活性剂的特性提供了一种光学方法。

参考文献:

[1]　叶艳,王石语,文建国.DPL的声光Q开关衍射特性[J].应用光学,2003,24(4):9-11.
YE Yan, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo. Diddraction characteristic of acousto optic Q switch in DPL[J]. Journal of Applied Optics, 2003,24(4): 9-11. (in Chinese with an English abstract)

[2]　李明,李冠成.声光效应实验研究[J].应用光学,2005,26(6):23-27.
LI Ming, LI Guan-cheng. Experimental investigation of acoustooptic effect[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(6): 23-27. (in Chinese with an English abstract)

[3] RIMEIKA R, CIPLYS D. Diffraction of guided optical waves by surface acoustic waves in GaN[J]. Appl. Phys. Lett., 2000,77(4):480-482.

[4] BARTER J D, LEE P H Y. Real-time wave-amplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces[J]. Appl. Phys. Lett,1994,64(15):1896-1898.

[5] YAMANAKA K,CHO H. Precise velocity measurement of surface acoustic waves on bearing ball[J]. Appl Phys Lett,2000,76(19):2797-2799.

[6] 苗润才,杨宗立.液体表面波物理特性及其光学效应的研究[J].物理学报,1996,45(9):1521-1525.
MIAO Run-cai, YANG Zong-li. The physical properties of liquid surface wave and its optical diffraction[J]. Acta Physica Sinica, 1996, 45(9): 1521-1525. (in Chinese with an English abstract)

[7] BARIK TARUN K, ANUSHREE R, SAYAN K. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves[J]. Am. J. Phys, 2005,73(8):725-729.

[8] RUNCAI Miao,ZONGLI Y,JINGTAO Z,CHANGYU S. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(17): 3033-3035.

[9] 苗润才,滕晓丽,叶青.液体表面低频声波的非线性声光效应[J].光子学报.2003,32(10):1264-1267.
MIAO Run-cai, TENG Xiao-li, YE Qing. Nonlinear acoustic optical effect from liquid surface waves at lowfrequency[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10) 1264-1267. (in Chinese with an English abstract)

[10] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics [M]. New York: McGraw-Hill,1968, 69-71.