

doi:10.3788/gzxb20144310.1005001

多振源低频液体表面波声光效应研究

苗润才, 马静, 孟峰, 许强

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710119)

摘要: 同时利用两个振源, 在液体表面上产生两列低频表面波, 实现了多振源条件下表面声光效应, 观察到清晰、稳定、反衬度高的声光衍射条纹. 当引起两列表面波的两个振源频率具有倍数关系时, 声光衍射条纹的极大值位置与较小频率的振源单独存在时所产生表面波的极大值位置相同, 与较大频率的振源单独存在时所产生表面波的极大值位置部分相同. 当引起两列表面波的两个振源频率不具备倍数关系时, 不仅观察到单振源的衍射条纹, 而且也观察到了双振源的干涉条纹. 理论上得到多振源衍射光场和表面波波长、振幅之间的解析表达式, 理论规律与实验结果吻合较好.

关键词: 光学测量; 信息光学; 光衍射; 复合光栅; 低频表面波; 多振源

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1005001-5

Acousto-optical Effect from Low-frequency Liquid Surface Waves Excited by Several Vibrators

MIAO Run-cai, MA Jing, MENG Feng, XU Qiang

(Institute of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to achieve the multi-vibration source surface acousto-optical effect, two vibration sources were used to generate two low-frequency surface wave on the liquid surface at the same time, and also the clear, stable, high contrast acousto-optic diffraction fringes were observed. When the two surface waves' frequency with multiple relations, the spot positions of diffraction pattern are same as the smaller frequency alone and are part of same the larger frequency alone. The diffraction fringes of single vibration source, and the interference fringes of double vibration source were observed when they don't have multiple relations. It was derived that the analytical expressions between multi source diffraction field and the wavelength of surface waves or and amplitude. The theoretical analysis agree well with experimental results.

Key words: Optical measurement; Information optics; Light diffraction; Composite grating; Low frequency surface wave; Multi-vibration sources

OCIS Codes: 050.1950; 070.1060; 070.2580; 070.4560; 070.7345

0 引言

激光自 20 世纪 60 年代问世以后, 很快被用于研究表面声波的性质. 1979 年, Weisbuch 等首次提出用低频液体表面波实现光的衍射光栅, 并以此建立了表面张力的光学测量方法^[1]. 该方法奠定了低频声光效应的基础, 同时也开辟了表面波物理特性光学测量的

新途径. 在此基础上, 文献[2-8]不仅报道了表面声波的声学可视化, 得到了高清晰度的稳态衍射条纹, 观察到特殊的缺级现象, 而且能够实时测量表面声波的振幅、波长、液体粘滞系数等参量, 同时对表面波振幅的衰减也进行了研究. 2005 年, Barik 利用同一振源, 在液体表面上产生两列波长相同的低频表面波, 并且观察到相应条件下的声光效应^[9]. 自 2010 年以来, 王文成

基金项目: 陕西省重大科技创新专项资金(No. 2010ZKC01-18)和陕西省自然科学基金(No. 2010JM1003)资助

第一作者: 苗润才(1957-), 男, 博导, 博士, 主要研究方向为声光理论及技术. Email: rc_miao@snnu.edu.cn

通讯作者: 马静(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为液体表面声光效应. Email: ma.jing0421@163.com

收稿日期: 2014-01-07; 录用日期: 2014-02-28

<http://www.photon.ac.cn>

等人对水下声源引起表面波的情况也进行了研究^[10-12].但是,迄今为止,对于不同波长、不同振幅的多表面波声光效应还未见相关报道.本文同时利用两个振源,研究两列波长不同的表面波的声光效应,结果发现:当引起两列表面波的两个振源频率具有倍数关系时,声光衍射条纹的极大值位置与较小频率的振源单独存在时所产生的表面波的极大值位置相同,与较大频率的振源单独存在时所产生的表面波的极大值位置部分相同,但强度分布不同;当两个振源频率不具备倍数关系时,得到了一类较复杂的衍射图样,不仅观察到单振源的衍射条纹,而且也观察到了双振源的干涉条纹.基于傅里叶光学理论,结合复合光栅原理^[13],分析了多振源表面波对入射激光的调制作用,得到了衍射光场和表面声波之间的解析表达式.解释了多振源表面声光衍射的实验结果,理论与实验结果相吻合.

1 多振源表面波声光衍射理论

当入射光照射到介质的表面上,介质表面上的声波对入射光调制并产生衍射,这就是表面声光效应的基本物理过程,其原理如图1.

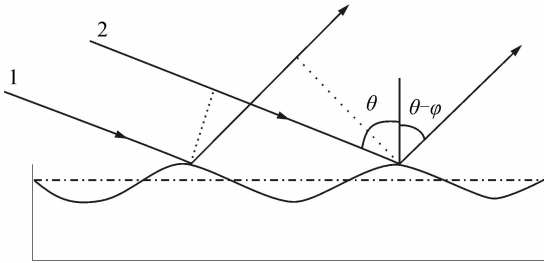


图1 实验原理

Fig.1 Principle diagram of the experimental

激光斜入射在表面上,入射角为 θ ,入射光在波面反射,反射角为 $\theta-\varphi$,其中 $\varphi/2$ 为激光入射点处波面的斜率.虽然实际上表面粒子的运动较为复杂,但对于单一振源,在振幅不大时,通常把这种运动近似为正弦波,即

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

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; ω 为表面波的角频率; k 为波矢量,且 $k=2\pi/\Lambda$, Λ 为表面波的波长.未扩束的激光照射在液体表面上,表面波对入射激光起到位相调制的作用,所以可认为其是位相型光栅,由于光速远大于表面波速度,在计算两束光的光程差时可近似认为波形没有变化,若在远场观察表面波的衍射图样,根据傅里叶光学,对单振源引起的正弦性表面波,可以得到观察面上衍射光场的复振幅分布^[13-14]为

$$u(x') = \frac{\exp[j\pi(2z^2 + x'^2)/z\lambda]}{j\lambda z} \times \Lambda \sum_n J_n(\beta) \sin c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda \cos \theta} \right) \right] \quad (2)$$

式中, z 为入射点到观察屏的距离, x' 为衍射光点在观察平面上的坐标, λ 为入射激光束的波长, L 为激光光斑的宽度; j 为虚数单位, J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数, $\beta=4\pi h \cos \theta/\lambda$.

当采用两个振源激发时,表面上可以看成存在两列表面波.根据波的独立性传播原理,观察屏上的衍射光场,可以看成是两列独立的波所产生衍射光场的叠加.假定两列波的衍射光场分别为 $u_1(x')$ 和 $u_2(x')$,则 $u_1(x')$ 和 $u_2(x')$ 的表达式与式(2)相同,分别为

$$u_1(x') = \frac{\exp[j\pi(2z^2 + x'^2)/z\lambda]}{j\lambda z} \Lambda_1 \sum_n J_n(\beta_1) \sin c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda_1 \cos \theta} \right) \right] \quad (3)$$

$$u_2(x') = \frac{\exp[j\pi(2z^2 + x'^2)/z\lambda]}{j\lambda z} \Lambda_2 \sum_m J_m(\beta_2) \sin c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{m}{\Lambda_2 \cos \theta} \right) \right] \quad (4)$$

因此,观察屏上光强度的表达式为

$$I(x') = |u_1(x') + u_2(x')|^2 = \frac{\Lambda_1^2}{\lambda^2 z^2} \sum_n J_n^2(\beta_1) \sin^2 c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda_1 \cos \theta} \right) \right] + \frac{\Lambda_2^2}{\lambda^2 z^2} \sum_m J_m^2(\beta_2) \sin^2 c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{m}{\Lambda_2 \cos \theta} \right) \right] + \frac{2\Lambda_1\Lambda_2}{\lambda^2 z^2} \cdot \sum_n J_n(\beta_1) \sum_m J_m(\beta_2) \cdot \sin c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda_1 \cos \theta} \right) \right] \sin c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{m}{\Lambda_2 \cos \theta} \right) \right] \quad (5)$$

式中, Λ_1 为振源I引起的表面波的波长, Λ_2 为振源II引起的表面波的波长, J_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数 $\beta_1=4\pi h_1 \cos \theta/\lambda$, $\beta_2=4\pi h_2 \cos \theta/\lambda$.由式(5)可以看出,衍射区的光强由三部分组成,分别为:与波列I有关的部分、与波列II有关的部分和波列I、II相互交叉的部分.式中,因子 $J_n^2(\beta_1)$ 和 $J_m^2(\beta_2)$ 给出了每级衍射条纹的相对强度,对于给定的入射角 θ 和激光波长 λ ,该强

度则是表面波振幅 h 的函数; $\sin^2 c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda_1 \cos \theta} \right) \right]$ 和 $\sin^2 c \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{m}{\Lambda_2 \cos \theta} \right) \right]$ 分别确定了每一部分衍射极大值的位置^[4].

2 实验装置

实验装置如图2,由四部分组成:低频信号发生

器,样品池,激光光源,光电数据采集和数据处理系统. 实验中使用的低频信号发生器,有 A 和 B 两个输出端,分别用于驱动两个振源,以产生两列不同波长、不同振幅的表面波,两个振源之间的距离为 8 cm. 液体样品为蒸馏水. 光源为 He-Ne 激光器,其波长为 632.8 nm,激光束经反射镜后,再经过光阑斜入射在液体表面上,入射角为 1.5 rad,激光光斑在液体表面上呈现椭圆状,长轴为 25 mm,短轴为 2.4 mm. 激光束经液面反射后,在观察屏上形成光学图样,实验中入射点到观察屏的距离约为 5 m. 用 CCD 直接对观察屏上的衍射图样进行成像,调节 CCD 与观察屏的距离和 CCD 成像镜头,使与 CCD 连接的电脑上的衍射图样达到最理想状态. 当观察屏与 CCD 的位置确定后,在观察屏上设置横向标准距离,并得到该横向标准距离与 CCD 像素之间的对应关系,这样即可得到衍射图样的横向坐标值,并存储在计算机上.

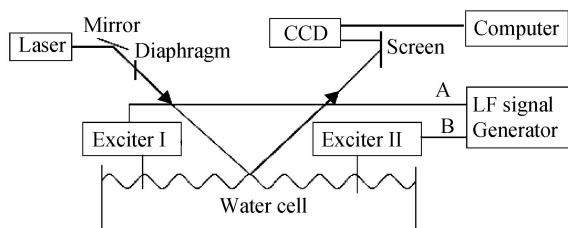


图 2 实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

3 实验和实验结果

按图 2 所示的实验装置,调整激光入射方向及光斑位置,椭圆型光斑的长轴与两个振源的连线方向平行,光斑位置处在两个振源连线的中点. 实验时,振源 I 的输入频率为 100 Hz,输入功率固定不变. 振源 II 的输入频率及输入功率可调,输入频率调节范围从 50 Hz 到 100 Hz,每次取样间隔为 5 Hz. 振源工作时,液体表面上出现表面波,观察屏上出现了表面波对入射激光的散射图样,当输入频率及振幅改变时,光学图样随之变化. 用 CCD 拍摄对应的图样,并存入计算机.

实验结果如图 3,其中图 3(a)对应的条件为振源 I 工作,频率为 100 Hz,输入功率一定,振源 II 关闭. 图 3(b)对应的条件为振源 I 和振源 II 同时工作,频率

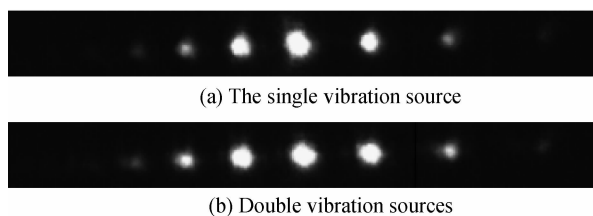


图 3 同频多振源衍射图样

Fig. 3 The diffraction patterns of vibration sources in same frequency

均为 100 Hz,并且两个振源的输入功率与 3(a) 相同. 可以看出,两幅图中衍射条纹均十分清晰,对比度非常高;两幅图样中极大值的位置相同,强度分布基本相同.

图 4 也是观察屏上出现的衍射图样. 其中图 4(a) 对应的条件为振源 I 工作,频率为 50 Hz,输入功率一定,振源 II 关闭. 图 4(b) 对应的是振源 I 的频率为 100 Hz,振源 II 的频率为 50 Hz,两个振源的输入功率与 4(a) 的相同. 4(c) 与图 4(a) 除输入频率不同外,其他的条件完全相同,4(c) 中振源 I 的频率为 100 Hz. 图 4(a) 和 4(c) 相比,除了条纹间隔不同外,条纹分布大致相同,图 4(a) 条纹间隔小,图 4(c) 条纹间隔大;将 4(b) 与 4(a)、4(c) 进行比较,结果显示 4(b) 的衍射级次最多,其中 ± 3 级衍射光斑,在图 4(a) 和图 4(c) 中均未观察到;同时,4(a) 和 4(b) 衍射条纹的极大值位置相同,4(c) 的 ± 1 、 ± 2 级与 4(b) 的 ± 2 、 ± 4 级相对应.

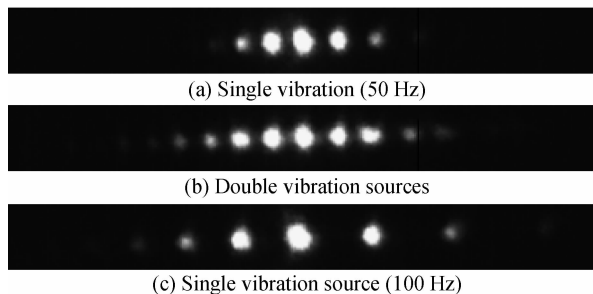


图 4 倍频多振源衍射图样

Fig. 4 The diffraction patterns of Multi-vibration source at frequency multiplication

图 5 为非倍频多振源衍射图样. 图 5(a)、5(c) 为单振源表面波的衍射图样,振源频率分别为 65 Hz 和 100 Hz,图 5(b) 为双振源表面波衍射图样,振源频率分别为 65 Hz 和 100 Hz,这两种频率不具备倍数关系. 将三幅衍射图样进行对比,从极大值位置上看,5(b) 同时包含了 5(a) 和 5(c) 的极大值,并且图 5(b) 的 ± 1 和 ± 5 级在 5(a) 和 5(c) 中找不出对应项;从光斑强度的分布上来看,5(a) 和 4(c) 的强度随着衍射级次的增大而减小,但图 5(b) 并没有这种强度分布规律.

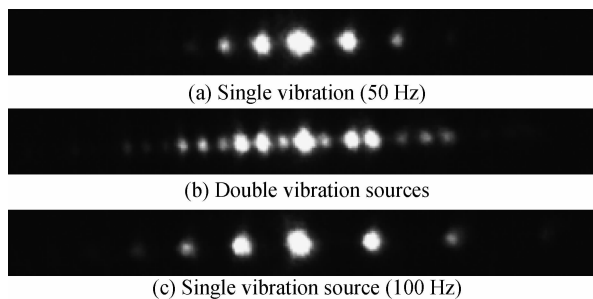


图 5 非倍频多振源衍射图样

Fig. 5 The diffraction patterns of Multi-vibration source at non-frequency multiplication

4 实验分析

4.1 两个振源同振幅、同频率

当两个振源频率和振幅相同时,由于入射光照射在两个振源连线的中点位置上,在这个位置上,两列波所有的参量均相同.即 $\Lambda_1 = \Lambda_2, \beta_1 = \beta_2, m = n$.由式(5)得到

$$I = \frac{4\Lambda^2}{\lambda^2 z^2} \cdot \sum_n J_n^2(\beta) \cdot \sin^2 \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda \cos \theta} \right) \right] \quad (6)$$

从光强表达式(6)可以看出,频率和振幅相同的两个振源和单一振源衍射的光强分布^[14]基本相同,同样由描述光强的部分和描述光斑位置的部分组成.实验结果表明:两幅图样中极大值的位置相同,强度分布基本相同.这一点与理论式(6)相符合.

表1 同频多振源相邻条纹的间隔和各级衍射条纹强度比
Table 1 The interval of the diffraction adjacent stripes and the ratio of diffraction intensity

| | d_{1-0}/cm | d_{2-1}/cm | I_1/I_0 | I_2/I_1 |
|--------------|---------------------|---------------------|-----------|-----------|
| Pattern 3(a) | 2.13 | 2.16 | 0.748 6 | 0.283 2 |
| Pattern 3(b) | 2.08 | 2.18 | 0.892 2 | 0.503 3 |

对图3用MATLAB软件进行扫描,利用实验装置部分中提到的方法,求出相邻衍射条纹的间隔 d ,再代入公式 $\Lambda = z\lambda/d \cos \theta$ 可以计算出波长.对图3(a)和3(b)的计算结果表明:两种情况下的表面波波长相等,均为3.2 mm.又通过对各级条纹强度值的测量,再与贝塞尔函数进行比较,可以得到 β 值,进而得到表面波的振幅.对图3(a)和3(b),得到的振幅分别为1.565 μm 和1.777 μm ,这两个值基本接近.与理论分析结果一致.

4.2 两振源振幅相同,频率具有倍数关系

与上述方法相同,对图4(a)和4(c)用MATLAB

表3 倍频多振源衍射图样各级次与零级条纹间隔(cm)

Table 3 The interval of diffraction pattern various levels and the zero order(cm)

| | d_{-4-0} | d_{-3-0} | d_{-2-0} | d_{-1-0} | d_{+1-0} | d_{+2-0} | d_{+3-0} | d_{+4-0} |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pattern 4(a) | | | 1.945 | 0.973 | 1.243 | 2.432 | | |
| Pattern 4(b) | 3.945 | 3.027 | 2.108 | 0.973 | 1.243 | 2.216 | 3.514 | 4.541 |
| Pattern 4(c) | | | 3.838 | 1.945 | 2.324 | 4.703 | | |

从表3中可以看出,除过各个衍射图样正、负级次具有明显的不对称关系外,单一振源频率为50 Hz的波的衍射极大值和两个振源同时存在时衍射极大值位置基本一样,单一振源频率为100 Hz的波与两个振源同时存在时的偶数级次的衍射极大值位置大体相同,这说明理论与实验结果是一致的.

表4 非倍频多振源衍射图样各级次与零级条纹间隔(cm)

Table 4 The interval of diffraction pattern various levels and the zero order(cm)

| | d_{-6-0} | d_{-5-0} | d_{-4-0} | d_{-3-0} | d_{-2-0} | d_{-1-0} | d_{+1-0} | d_{+2-0} | d_{+3-0} | d_{+4-0} | d_{+5-0} | d_{+6-0} |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pattern 5(a) | | | | | 2.541 | 1.243 | 1.459 | 3.081 | | | | |
| Pattern 5(b) | 3.892 | 3.297 | 2.595 | 2.054 | 1.297 | 0.703 | 0.649 | 1.459 | 2.216 | 3.135 | 3.892 | 4.541 |
| Pattern 5(c) | | | | | 3.838 | 1.945 | 2.324 | 4.703 | | | | |

软件编程并且进行扫描,并进行计算,得到表2.

表2 倍频振源相邻条纹的间隔和各级衍射条纹强度比
Table 2 The interval of the diffraction adjacent stripes and the ratio of diffraction intensity

| | d_{1-0}/cm | d_{2-1}/cm | I_1/I_0 | I_2/I_1 |
|--------------|---------------------|---------------------|-----------|-----------|
| Pattern 4(a) | 1.11 | 1.11 | 0.814 1 | 0.351 7 |
| Pattern 4(c) | 2.13 | 2.16 | 0.748 6 | 0.283 2 |

经过计算,图4(a)对应的波长为6.3 mm,振幅为1.711 μm ;图4(c)对应的波长3.2 mm,振幅为1.565 μm .所以 $\Lambda_2 = 2\Lambda_1$ 近似成立.虽然两个振源的输入功率相同,但是经过计算得到的振幅却是不同,50 Hz的振幅大于100 Hz的振幅.经过对低频表面声波随距离衰减的研究知道,表面波的衰减系数具有明显的色散效应,频率越大,衰减系数越大^[15].所以出现这种情况的原因是由于表面声波经过一段距离的传播之后,衰减的程度不同而导致的.

将式(5)中前两个求和号中的位置因子分别用 $\sin^2 \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda_1 \cos \theta} \right) \right]$ 和 $\sin^2 \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{m}{\Lambda_2 \cos \theta} \right) \right]$ 表示,若这两个因子均出现极大值时,由于 $\Lambda_2 = 2\Lambda_1$,则必然有 $m = 2n$.这说明振源I产生的表面波的衍射极大值的 $\pm 1, \pm 2$ 级的位置必然和振源II所产生的波的 $\pm 2, \pm 4$ 级衍射极大值的位置重合.对于式(5)中第三个求和符号,只有 $\sin^2 \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda_1 \cos \theta} \right) \right]$ 和 $\sin^2 \left[L \left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{m}{\Lambda_2 \cos \theta} \right) \right]$ 同时处在衍射极大值位置时才会有值,否则交叉项为零.这就是说,当频率具有倍数关系时,两个振源产生的表面波,其衍射场的极大值所对应的光斑只有完全重合和完全不重合两种情况.通过对图4的三幅图样进行扫描,得到表3.

4.3 两振源振幅相同,频率不具有倍数关系

当两个振源分别处在100 Hz和65 Hz的时候,得到了一种特殊的衍射图样,如图5所示.用肉眼观察,图5(b)的衍射图样中,同时包含了图5(a)和图5(c)的位置信息,同时,还有两个级次与图5(a)和图5(c)的位置信息无关.经过计算,得到表4.

从表4可以看出:图5(b)的 ± 2 、 ± 4 级和图5(a)的 ± 1 、 ± 2 级的位置相对应,图5(b)的 ± 3 、 ± 6 级和图5(c)的 ± 1 、 ± 2 级相对应.所以,图5(b)包含了单振源的衍射图样.按照前述理论,光照区域可以看成是两套光栅常数不同的位相型光栅,两列波叠加后得到的衍射图样可以看作两列波分别对激光进行衍射,然后再叠加.所以,当引起两列表面波的振源频率为100 Hz和65 Hz时,由于两个振源引起的表面波波长之间不存在倍数关系,在衍射屏上得到的两个衍射图样的级次 m 、 n 之间也没有倍数关系,即两个衍射图样的极大值之间会出现以下三种情况:第一幅衍射图样中各个光斑会和第二幅中的光斑完全重合、完全不重合和部分重合.在第一种情况下,相互重叠的光斑会发生干涉情况,但是干涉的效果不会超出两个光斑原有大小,即不影响两个光斑的位置;在第二种情况下,两个光斑则互不干扰,同时它们的位置也不会发生变化;而两个部分重合的光斑也会产生干涉现象,但是这种干涉会导致光斑的破裂,在衍射图样中,就会使光斑数目有所增多.不过,增加的光斑位置,即式(5)中的第三项不能精确确定.所以,5(b)的衍射图样中,不仅观察到了单振源的衍射图样,同时观察到多振源的干涉图样.这是以前的实验中没有发现过的现象.

5 结论

1)实现了多振源条件下液体表面声光效应,得到不同频率、不同振幅的两列表面声波的衍射图样,衍射图样清晰、稳定、反衬度高,并且与单振源的声光衍射图样所呈现出的规律不相同;

2)给出了衍射光场和表面波波长、振幅之间的解析表达式,并且得到衍射图样极大值位置的分布规律;

3)不断调节振源II的频率,当引起的两列表面波的振源I和振源II的频率恰好是倍数关系时,衍射图样极大值的位置能通过表达式直接确定,当振源I和振源II的频率不具有倍数关系时,发现存在干涉效应,不过衍射图样极大值的位置不能精确给出,理论与实验结果吻合较好.

参考文献

- [1] WEISBUCH G, GARBAY F. Light scattering by surface tension waves[J]. *American Journal of Physics*, 1979, **47**(4): 355-356.
- [2] YANG Yong-zheng. The physical properties of liquid surface wave grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(2): 183-188.
- [3] MIAO Run-cai, YANG Zong-li. Physical properties of liquid surface wave and its optical diffraction[J]. *Acta Physica*

Sinica, 1996, **45**(9): 1521-1525.

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.

- [4] MIAO Run-cai, YANG Zong-li, ZHU Jing-tao. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction[J]. *Applied Physics Letter*, 2002, **80**(17): 3033-3035.
- [5] DONG Jun, QI Jian-xia, MIAO Run-cai. Measurement of the damping of liquid surface wave by diffraction[J]. *American Journal of Physics*, 2007, **37**(3B): 1129-1133.
- [6] ZHU Feng, MIAO Run-cai, XU Chun-long, et al. Measurement of the dispersion relation of capillary wave by laser diffraction[J]. *American Journal of Physics*, 2007, **75**(10): 896-898.
- [7] MIAO Run-cai, ZHAO Xiao-feng, SHI Jian. Modulated interference of reflected light from a liquid surface wave at tens hertz frequencies [J]. *Optics Communication*, 2006, **259**(2): 592-597.
- [8] MIAO Run-cai, WANG Yu-ming, MENG Feng, et al. Low frequency underwater acoustic signal of laser detection and wave attenuation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 432-436.
- 苗润才,王玉明,孟峰,等.水下低频声信号的激光探测及波的衰减[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 432-436.
- [9] TARUN K B, ANUSHREE R, SAYAN K. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves[J]. *American Journal of Physica*, 2005, **73**(8): 725-729.
- [10] MIAO Run-cai, WANG Yu-ming, MENG Feng, et al. Optical measurement of the liquid surface wave amplitude with different intensities of underwater acoustic signal[J]. *Optics Communication*, 2014, **313**(2014): 285-289.
- [11] MIAO Run-cai, LI Neng-neng, GAO Mei-ling, et al. The relationship of liquid surface wave amplitude and inspire deep [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 828-830.
- 苗润才,李能能,高美玲,等.液体表面波振幅与激发深度的关系[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 828-830.
- [12] MIAO Run-cai, WANG Wen-cheng, XU Jia-ting, et al. The liquid of micro vibration amplification effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1205-1209.
- 苗润才,王文成,许佳婷,等.液体对微振动的放大效应[J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1205-1209.
- [13] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1968: 69-71.
- [14] MIAO Run-cai, LUO Dao-bin, ZHU Feng, et al. Laser diffraction fringes characteristics of low-frequency liquid surface waves[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2134-2137.
- 苗润才,罗道斌,朱峰,等.低频液体表面波激光衍射条纹的特征[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2134-2137.
- [15] LUO Dao-bin, MIAO Run-cai, LIU Xiang-lian. Study on diffraction and damping characteristics of low-frequency liquidsurface waves[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 584-586.
- 罗道斌,苗润才,刘香莲.低频液体表面波的光衍射及衰减特性的研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(6): 584-586.