

文章编号: 1001-3806(2011)02-0173-04

可调相位型液体表面波衍射光栅效应的研究

祁建霞¹, 时 坚², 苗润才³

(1. 西安邮电学院 理学院, 西安 710121; 2. 西安邮电学院 电子工程学院, 西安 710121; 3. 西安航空技术高等专科学校, 西安 710077)

摘要: 为了研究可调相位型液体表面波光栅的衍射效应, 采用低频信号发生器驱动振子, 激发产生液体表面波的实验方法, 得到了清晰、稳定的衍射图样, 观察到衍射条纹间距随着液体表面波频率的改变而改变。并且在特定频率输出条件下, 改变表面波振幅, 可以得到衍射条纹的缺级现象。根据物理光学理论, 周期性振动的表面波可以视为一相位型光栅, 对入射光进行相位调制的理论模型, 理论上得出了衍射条纹的强度分布与表面波振幅之间的解析表达式, 很好地解释了条纹间距变化和缺级现象, 和实验符合较好, 并且与普通刻痕光栅的光衍射现象进行了对比分析。结果表明, 二者虽然表象类似, 但物理机理却有很大差异。由于液体表面波的参量具有可调性, 因此其衍射效应明显, 可用于教学和科研。

关键词: 衍射与光栅; 低频液体表面波; 相位调制; 平面刻痕光栅

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.009

Study about tunable phase modulation gratings by means of liquid surface wave

QI Jian-xia¹, SHI Jian², MIAO Run-cai³

(1. School of Science, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China; 2. School of Electronic Engineering, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China; 3. Xi'an Aerotechnical College, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to study the diffraction effect of the tunable phase modulation grating, steady and explicit diffraction patterns were obtained with the low-frequency generator driving the exciter to generate the low-frequency liquid surface wave (LFLSW). The distance between the diffraction patterns was variable with the frequency of the surface wave. Furthermore, the diffraction order might disappear at certain amplitude of the LFLSW. According to the physical optics theory, the periodical modulated LSW can be regarded as a phase modulated grating. The corresponding analytic expression of intensity distribution of diffraction patterns was derived, which explained the experimental phenomenon well. And the diffracted effect of the LSW was compared with that of the plane scotch grating. The results show that the LSW gives better diffracted effect.

Key words: diffraction and gratings; low-frequency liquid surface wave; phase modulation; plane scotch grating

引言

衍射光栅是一种优良的分光元件, 它可以把复色光分为单色光, 而且它又具有棱镜无法比拟的优点: 不受材料限制, 能用于从红外直到真空紫外的全部波段。近十几年来, 光栅制造技术不断提高, 产量也不断增加, 除用作分光元件外, 光栅也可用作长度和角度的精密、自动测量(计量光栅)以及激光技术中的调制元件(超声光栅)等^[1-3]。测量光栅常数及利用光栅测光波

波长也是重要的大学物理实验内容, 其中所用光栅多为平面光刻光栅, 光栅划痕密度为 0.5 条/mm ~ 2400 条/mm, 肉眼很难观察到, 因此, 从感观角度上, 学生对光栅的具体形态特征并没有直观认识^[4]。实际上, 根据光栅定义可知, 只要能够对入射光波的波前实现周期性调制, 均可认为是衍射光栅。生活中不乏有这样的例子。例如在一定的近似条件下, 周期性振动的水波可以认为是位相型光栅, 能够实现光波的周期性调制^[5]。

1 实验装置及原理图

实验装置及原理图见图 1。低频信号发生器输出的信号驱动表面波激发器, 在液体表面上产生表面波。该液体表面波可以看作位相型光栅。表面波激发器固定在一个可以上下左右调节位置的支架上。以调节声

基金项目: 西安邮电学院高等教育教学改革研究资助项目

作者简介: 祁建霞(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事声光技术的研究。

E-mail: qjx_2001_ren@163.com

收稿日期: 2010-05-04; 收到修改稿日期: 2010-07-06

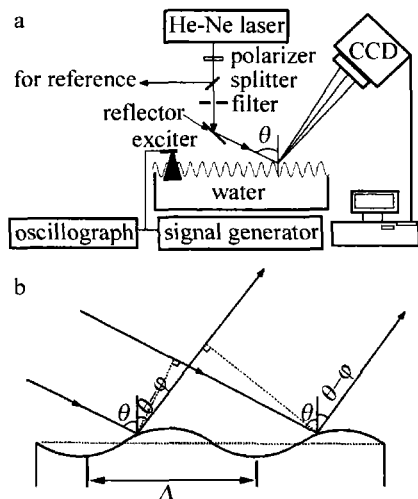


Fig. 1 a—schematic diagram of experimental setup b—principle of experiment

波波源与入射光之间的距离及表面波的振幅。样品池放置在温度可以调节的热源上,以改变液体样品的温度。MBL型全固态激光器所产生的激光束经分束镜分为2束,其中一束用作参考光,另一束经小孔滤波器和反射镜后直接斜入射在液体表面上。当液体表面产生表面波后,观察衍射光场。并调节表面波发生器的位置,改变信号发生器的输出功率,使液体表面波衍射图样尽可能清晰。在衍射光场中,用面阵电荷耦合器件(面阵 CCD)接收衍射图,并直接输入计算机存储和处理。实验中,采用的液体为蒸馏水,CCD 的大小为 $7.95\text{mm} \times 6.45\text{mm}$,信噪比超过 48dB。

2 实验现象及分析

实验中利用低频信号发生器驱动振子,激发液体表面。并且,可以通过调节发生器的输出功率,来调节表面波的振幅。当表面波发生器产生表面波后,远场可以观察到非常清晰的衍射条纹,用 CCD 接收低频液体表面波的声光远场衍射其结果如图 2、图 3 所示。

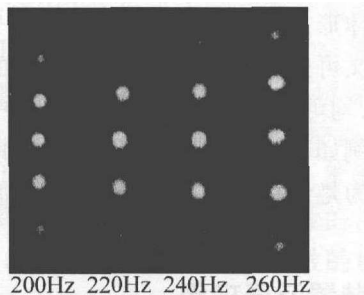


Fig. 2 The diffraction pattern at different frequency

图 2 所描述的是在不同输出频率条件下,对入射光波的调制效果,分别表示 200Hz,220Hz,240Hz,260Hz 情况下所接收的衍射图样。图 3 表示在同一频率、不同输出功率条件下,所接收的衍射图样。其中图 3a、图 3b、图 3c 分别为表面波的振幅不断增大时采集的图样。

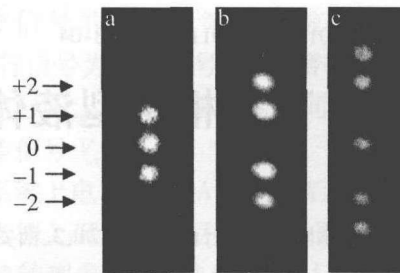


Fig. 3 The diffraction pattern with different amplitude at 220Hz

现在分别对图 2 和图 3 中的实验图样进行分析。在图 2 中可以看出,随着信号发生器的输出频率提高,即表示液体表面波的频率提高,衍射图样中条纹间距变小,但 0 级条纹的位置不变。从图 3 的图样中可看到衍射条纹的相对强度随着表面波振幅变化。当振幅满足一定条件时,出现条纹缺级现象。当表面波的振幅较小时,衍射现象见图 3a,是常见的衍射图案:依次有衍射 0 级,正负 1 级,正负 2 级等。其中 0 级衍射光斑光强最大,以后各级光斑的强度随着级次的增大而减小。当表面波的振幅逐渐增大时,衍射光场的强度分布将发生变化,而且会出现条纹的消失现象,如图 3b 及图 3c 所示。

当然,在平面刻线光栅的光学衍射实验中,也会出现条纹间距改变和缺级现象,但与表面波光栅的衍射效应相比较,二者的物理机理是不同的。例如,缺级不会造成 0 级的缺失;其次,实验中,没有改变信号发生器的输出频率,而只是增大输出功率,表面衍射光栅的光栅常数没有改变。下面对上述现象进行较为详细的理论分析。

3 理论分析

一般来说,周期性驱动激发的液体表面运动可以近似为正弦波,因此,液体表面波 (liquid surface wave, LSW) 波函数可写为^[6]:

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

式中, Y 为纵向坐标, x 是沿着波传播方向的坐标, A 为液体表面波振幅, ω 为频率, $k = \frac{2\pi}{\Lambda}$, Λ 表示 LSW 波长。

未扩束的激光照射在液体表面波上,由于激光束斜入射到液体表面,所以液面上入射光斑为一椭圆,光斑长轴与表面波传播方向一致。现在考察 LSW 对光的衍射,LSW 对入射光起到位相调制作用,所以,可以认为其是位相型正弦光栅,由于光速远大于 LSW 波速,在计算两束光的光程差时,可近似认为波形没有变化。实验原理图如图 1b 所示,根据物理光学的衍射理论知,表面波的光栅方程为^[7]:

$$\Lambda(\sin\theta - \sin\varphi) = j\lambda \quad (2)$$

式中, θ 为入射角, φ 是衍射角。

现在定义 $\Delta\varphi_{+j}, \Delta\varphi_{-j}$ 为衍射 $+j, -j$ 级条纹相对于 0 级条纹的角宽度, 则有:

$$\Delta\varphi_{+j} = \Delta\varphi_{-j} = \frac{j\lambda}{\Lambda\cos\theta} \quad (3)$$

因此, 在距离衍射区域为 z 的接收屏上, 衍射 $+j, -j$ 级条纹相对于 0 级条纹的间距为:

$$\Delta x_{+j} = \Delta x_{-j} = z \cdot \frac{j\lambda}{\Lambda\cos\theta} \quad (4)$$

(4) 式表示液体表面光栅的衍射条纹的间距, 这与平面刻痕光栅的光栅方程类似。

根据液体表面波的色散关系可知^[8]:

$$\Omega^2 = gk + \frac{\sigma k^3}{\rho} \quad (5)$$

式中, Ω 表示液体表面波的频率; g 为重力加速率; ρ 为液体密度; σ 为液体的表面张力。根据 (5) 式可知, 改变表面波的频率, 则液体表面波的波矢量也随之改变, 也就是说, 表面波光栅的光栅常数发生变化。

因此, 对于平面刻痕光栅方程, 可变参量只有入射角, 即衍射条纹的间距只会随着入射角度变化而改变。而对于液体表面波光栅而言, 液体表面波波长 Λ 是频率的函数。因此, 在不改变实验光路的情况下, 简单改变低频信号发生器的驱动频率, 就可以得到不同间距的衍射条纹, 实验现象观察明显, 物理意义清晰。

下面对衍射缺级现象进行分析。液体表面波的周期性振动, 能够对入射光波的波前进行空间位相调制, 因此, 可以将液体表面波视作一相位型光栅。设平面波的振幅为单位振幅, 平面波经液体表面反射后, 该位相型光栅对光的位相调制作用为^[9]:

$$f(x, y) = \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [(2h\cos\theta)\sin(\Omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]\right\} \quad (6)$$

式中, h 表示液体表面波的振幅; λ 表示入射光束的波长; Ω 表示水表面波的频率; \mathbf{k} 表示液体表面声波的波矢量; \mathbf{r} 表示位置坐标; θ 为入射角。实验中, He-Ne 激光器输出波长为 632.8nm, $\theta = 1.432\text{rad}$, $z = 8.32\text{m}$, 表面波频率为 220Hz, 液体表面波波长 $\Lambda = 2.1\text{mm}$ 。

根据傅里叶光学知识可知, 夫琅和费衍射区光的振幅为^[10]:

$$U(x') = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \delta\left(L \frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda\cos\theta}\right) \quad (7)$$

式中, $J_n(\beta)$ 为贝塞尔函数, $\delta(\quad)$ 为脉冲函数。

引入位相调制因子 β , 定义为: $\beta = \frac{4\pi h\cos\theta}{\lambda}$, 则衍射场中的光强分布为:

$$I(x') = \sum_n J_n^2(\beta) \delta^2\left[\left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda\cos\theta}\right)\right] \quad (8)$$

式中, x' 是观察平面的坐标变量; z 是入射点到观察平面之间的距离。

对应 n 级衍射亮斑的坐标位置为:

$$x_n' = \frac{n\lambda z}{\Lambda\cos\theta} \quad (9)$$

现在就能够对图 3 中的各衍射级强度变化情况进行合理的解释了。由 (8) 式可知, 第 n 级衍射条纹的强度是与调制因子 β 相关。当改变信号发生器的输出功率, 则表面波振幅也随之发生变化, 位相调制因子 β 决定该级衍射的强度, 即表面波振幅影响衍射场的强度分布, 其关系见图 4。作者给出了衍射光场 0 级、1 级、

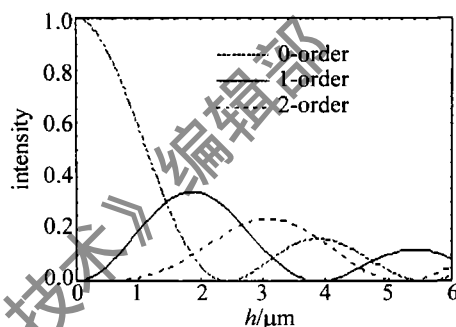


Fig. 4 Relationship between the amplitude and the intensity distribution of diffraction pattern

a—the zero-order b—the first order c—the second order

2 级衍射的强度变化与表面波的振幅之间的关系图, 横坐标表示表面波的振幅 h , 纵坐标表示 $J_n^2(\beta)$, 即衍射光场的强度。从图中可以发现, 衍射光场中各级亮斑的强度随表面波的振幅 h 的逐渐增大而发生变化。

如图 4 所示, 随着横坐标表面波的振幅 h 逐渐增大, $J_0(\beta(h))$ 逐渐减小, 意味着衍射光场中 0 级光斑的强度逐渐减弱。而与此同时, 正负 1 级, 正负 2 级衍射的强度逐渐增大。当表面波的振幅 h 增大到 $h_0 = 2.430\mu\text{m}$ 时, $J_0(\beta(h_0)) = 0$ (此时 β 是 J_0 的一个根), 意味着衍射光场 0 级光斑的强度为 0, 即图 3b 中 0 级消失; 然后, 继续增大表面波的振幅 h , $J_0(\beta(h))$ 又逐渐增大, 意味着衍射光场 0 级重新出现, 并逐渐增强。同样道理, 当表面波的振幅 h 增大到 $h_1 = 3.870\mu\text{m}$ 时, $J_1(\beta(h_1)) = 0$ (此时 β 是 J_1 的一个根), 意味着衍射光场正负 1 级光斑的强度为 0, 即图 3c 中正负 1 级光斑消失。理论分析与实验结果完全符合。

从上述分析可知, 液体表面光栅的衍射条纹的强度分布与平面刻痕光栅的衍射效应有着物理机理上的不同。虽然从表象上看, 二者均可以出现缺级现象, 但从物理本质上说, 液体表面光栅的缺级效应是由于光栅对入射光波的相位调制强度大小决定的。改变表面

波振幅大小,则光栅的相位调制深度也相应发生变化,根据前面分析可知,只要 β 是贝塞尔函数的根时,相对应的衍射级就会出现缺级,与表面波的频率没有关系。因此,通过这种缺级效应来测量液体表面波的振幅大小。而对于平面刻痕光栅的缺级效应,是由于单缝的衍射极小值与干涉极大值重叠效应所致,并且不会出现0级缺级现象。

4 结论

对液体表面波的光衍射效应进行了研究。根据衍射光栅定义可知,收到周期性激发的液体表面振动可以视作一相位型光栅,能够对入射光波进行相位调制,在反射方向上可以观察到衍射图样。实现中,利用低频信号发生器驱动振子,激发液体表面波,经过扩束后的激光束倾斜入射到表面波激发区域,通过改变信号源的输出频率和功率来改变表面波的光栅常数和振幅,从而实现光波的相位调制效应。实验上观察了清晰稳定的衍射条纹,条纹间距随着输出频率的变化而改变大小,并且随着表面波振幅大小的变化,观察了衍射缺级效应。根据物理光学理论,对这些现象进行了分析研究,并且得出了衍射条纹间距和强度分布与表面波参量之间的解析表达式,理论与实验符合较好。将这种现象与普通的平面刻痕光栅进行了对比,表明二者虽然具有相似的实验现象,但从物理机理上来说,却有很大差异,普通的刻痕光栅所出现的缺级现象是由于衍射极小值和干涉极大值的重叠效应所致;而对于刻痕光栅而言,光栅常数确定,不能改变。液体表面波光栅则无此限制,可以通过调节信号发生器的输出

频率,来调节光栅常数,以观察入射光波色散效应与光栅常数的关系。此外,根据流体力学知识,该方法可以用于液体参量的测量,根据采集到的衍射图样进行分析,得到液体表面张力,粘滞系数等相关参量,因此具有较大的应用前景。

参考文献

- [1] LIAO Y B. The principle and application of optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 152-201 (in Chinese).
- [2] BORN M, WOLF E. Principle of optics[M]. 7th ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1999: 160-224.
- [3] RAGINI S, CLAIRE G, POCHI Y. Properties of photorefractive gratings with complex coupling constants[J]. Journal of the Optical Society of America, 1991, B8(5): 1047-1052.
- [4] HE X R, ZHANG W P, CHEN M X. Fresnel diffraction of a plane transmission grating[J]. College Physics, 2007, 26(2): 1-4 (in Chinese).
- [5] QI J X, MIAO R C, DONG J. Measurement of damping constant of liquid surface wave at low frequency by light diffraction method[J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 496-498 (in Chinese).
- [6] LARSON D A, BLACK T D, GREEN M, et al. Optical modulation by a traveling surface acoustic wave and a holographic reference grating[J]. Journal of the Optical Society of America, 1990, A7(9): 1745-1750.
- [7] ZHAO K H, ZHONG X H. Optics[M]. Beijing: Peking University Press, 1983: 143 (in Chinese).
- [8] LIN M, HUANG J J. The testing system for the coefficient of surface tension based on the principle of grating diffraction[J]. Metrology & Measurement Technique, 2000, 4(9): 22-23 (in Chinese).
- [9] DUNCAN B D. Visualization of surface acoustic waves by means of synchronous amplitude-modulated illumination[J]. Applied Physics, 2000, 39(17): 2888-2895.
- [10] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. 2nd ed. San Francisco, United States: McGraw-Hill, 1996: 62.

(上接第172页)

够动态实现随机角度扫描的功能。

参考文献

- [1] LUO B L, WANG Ch Ch, DU J L, et al. Study on laser beam combination by binary phase grating[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 381-384 (in Chinese).
- [2] WANG L, ZHANG Ch, YAO Zh Sh, et al. Simulation of liquid crystal diffraction grating[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2006, 21(2): 113-118 (in Chinese).
- [3] ZHANG C Y, HUANG Z Q. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1231-1235 (in Chinese).
- [4] REN H W, FAN Y H, WU S T. Polymer network liquid crystals for tunable microlens arrays[J]. Journal of Physics, 2004, D37(14): 400-403.
- [5] WANG L, ZHANG Ch. The technical evolvement of liquid crystal grating and its application[J]. Advanced Display, 2006, 61(25): 39-

44 (in Chinese).

- [6] BOWLEY C C, CRAWFORD G P. Diffusion kinetics of formation of holographic polymer-dispersed liquid crystal display material[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(16): 2235-2237.
- [7] MA J, LIU Y G, YU T, et al. Preparation of two-dimensional electrically tuning polymer/liquid crystal grating by holography[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2005, 20(2): 115-118 (in Chinese).
- [8] CAO Zh L, MU Q Q, HU L F, et al. Diffractive characteristics of the liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese Physics, 2007, 16(6): 1665-1671.
- [9] LI B Y, PANG X L, HUANG Zh X. Phase shifter using nematic liquid crystals[J]. Electronic Components and Materials, 2007, 26(5): 1-3 (in Chinese).
- [10] ZHENG X R, DENG W L, FAN J M, et al. An IP simulation and verification platform based on FPGA[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(1): 38-42.