

折射率介质在制栅和云纹干涉法中的应用

张云祥 石玲 戴福隆

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘 要 利用光在折射率介质中传播可以减小光波波长的性质, 提出用折射率介质法制作高频全息光栅技术, 使光栅频率突破理论极限 $2/\lambda$; 并将折射率介质应用于云纹干涉法中, 当试件栅频率为 600 1/mm 时, 虚栅频率可达到 6000 1/mm , 利用其 ± 5 级衍射光进行干涉, 测量灵敏度由 $0.83\ \mu\text{m}$ 提高到 $0.16\ \mu\text{m}$ 。

关键词 折射率介质, 全息光栅, 云纹干涉法, 灵敏度。

1 引 言

高频光栅在量子效应电子学、光电子学、X射线衍射光谱学、光波导学以及精细网格等领域具有重要的应用价值。其中作为细观实验力学方法之一的精细网格法^[1]要求刻蚀或复制到被测试件表面的光栅具有足够的栅格密度, 以满足对材料微区范围内急剧变化的应力应变场测量的要求。根据这一需要, 本文将折射率介质用于制栅技术中, 制得光栅的最高频率为 5200 1/mm 。

随激光技术的迅速发展, 实验力学领域出现了全息干涉^[2]、散斑干涉^[3]、云纹干涉^[4]等一系列变形测量技术, 为了将已有的光测力学实验方法拓宽到细观实验力学的应用中去, 在传统云纹干涉法的基础上, 采用折射率介质, 利用高衍射级次相互干涉, 提高了该方法的灵敏度, 使每级位移条纹的灵敏度达到 $0.16\ \mu\text{m}$, 为细观力学的研究提供了有效的测量手段。

2 原 理

2.1 折射率介质法制栅原理

全息光栅通常由两束相干准直光线以一定角度在空间相交、干涉形成。得到的光栅栅距 p 与入射光波波长 λ 及两光束夹角的一半 θ 之间的关系为:

$$p = \lambda / 2 \sin \theta \quad (1)$$

由(1)式可知, 对于某一特定的波长 λ , 当 θ 接近于 90° 时, 可得到光栅的极限频率为 $2/\lambda$ 。欲获得更高频率的光栅, 需要减小入射光的波长, 因此用倍频光制栅可提高光栅的频率。但这种方法需要复杂的控制电路和光路系统。本文采用简单易行的折射率介质法, 使光线在折射

率介质中传播并相互干涉，则(1)式成为：

$$p = \lambda_0 / 2n \sin \theta \tag{2}$$

折射率介质法制作高频全息光栅的光路原理如图 1 所示。记录介质均匀涂布在基片上，匹配液充满折射率介质与基片间的空隙。

为清楚起见，将光线在介质中传播的途径放大如图 2 所示。其中 n, n_1, n_2, n_3 分别为折射率介质、匹配液、基片和记录介质的折射率。

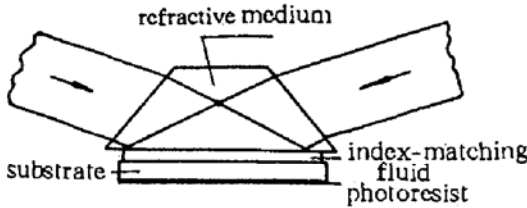


Fig. 1 Schematic diagram of grating fabrication by refractive medium method

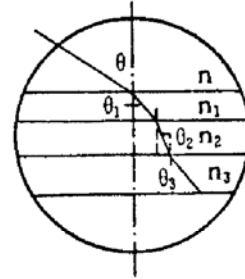


Fig. 2 The beam travelling in the media

选择适当的介质和匹配液，以保证各个界面处不发生全反射。由折射定律：

$$n \sin \theta = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3, \tag{3}$$

将(3)式代入(2)式，得：
$$p = \lambda_0 / (2n_3 \sin \theta_3). \tag{4}$$

可见，在记录介质上形成的光栅密度与在折射率介质内形成的光栅密度相同，匹配液与基片的存在不影响制栅的频率。

2.2 介质云纹干涉法原理

图 3 为双光束对称入射的云纹干涉光路图。由于干涉理论知，当两束对称入射的准直光波 O 和 R 的入射角之半 θ_m 满足

$$\sin \theta_m = m\lambda f \tag{5}$$

时，将获得沿试件表面法线方向的 O 的正 m 级和 R 的 $-m$ 级衍射光波。试件受力前，两个衍射波 O_0 和 R_0 视为平面波，可分别表示为：

$$O_0 = A \exp(i\psi_0), \quad R_0 = A \exp(i\psi_r), \tag{6}$$

其中 A 为振幅，位相 ψ_0, ψ_r 为常数。

当试件受力变形后，衍射波由平面波变为和表面位移有关的形变波前 O_r 和 R_r ：

$$O_r = A \exp\{i[\psi_0 + \varphi_0(x, y)]\}, \quad R_r = A \exp\{i[\psi_r + \varphi_r(x, y)]\}. \tag{7}$$

当试件表面具有三维位移时，可推导出位相变化 $\varphi_0(x, y), \varphi_r(x, y)$ 与试件表面 x, z 方向的位移 u, w 的关系(只考虑栅线主方向与 x 轴平行的情况)为：

$$\begin{aligned} \varphi_0(x, y) &= (2\pi/\lambda)[w(x, y)(1 + \cos \theta_m) + u(x, y)\sin \theta_m], \\ \varphi_r(x, y) &= (2\pi/\lambda)[w(x, y)(1 + \cos \theta_m) - u(x, y)\sin \theta_m]. \end{aligned} \tag{8}$$

两束衍射波前经成像系统后在照相底板上发生干涉，光强为：

$$I(x, y) = (O_r + R_r)(O_r + R_r)^* = 4A^2 \cos^2 \frac{1}{2}[\alpha + \delta(x, y)] \tag{9}$$

其中：
$$\alpha = \psi_0 - \psi_r, \quad \delta(x, y) = \varphi_0(x, y) - \varphi_r(x, y). \tag{10}$$

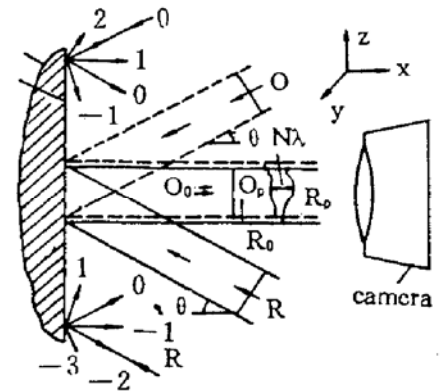


Fig. 3 Schematic diagram of moire interferometry

将(8)式代入(10)式得：
$$\delta(x,y) = (4\pi/\lambda)u(x,y) \sin \theta_m \tag{11}$$

当 $\delta(x,y)$ 为 2π 的整数倍时，将出现亮条纹，即：

$$\delta(x,y) = 2\pi m_x \tag{12}$$

将(5)式、(11)式代入(12)式，得：
$$u(x,y) = m_x/2mf \tag{13}$$

同理，当栅线主方向与 y 轴平行时，可得到另一面内位移 $v(x,y)$ 与条纹图之间的关系为：

$$v(x,y) = m_y/2mf \tag{14}$$

与传统云纹干涉法^[4]相比，采用 $\pm m$ 级衍射的云纹干涉法灵敏度提高到原来的 m 倍。本文将折射率值为 1.74 的重火石玻璃块置于云纹干涉光路中，得到 ± 5 级衍射波相干涉的云纹条纹图，提高了利用 ± 1 级或 ± 2 级衍射波相干涉的现有云纹干涉法的测量灵敏度。

介质云纹干涉法光路如图 4 所示。当一束相干准直光由介质的斜平面垂直进入折射率介质时，其中一部分光束直接入射到试件栅上引起衍射，另一部分光束经增反镜面反射后对称地入射到试件栅上发生衍射，这两部分衍射光在试件前表面处形成虚栅。与图 3 相比，图 4 利用增反镜使双光束对称入射简化为单束准直光入射，减少了光能的损失。

试件与折射率介质交界处涂布的匹配液是为了使光束由介质内部顺利到达试件表面而不致于发生全反射。与(3)式相同的道理，匹配液的存在不影响虚栅的频率。

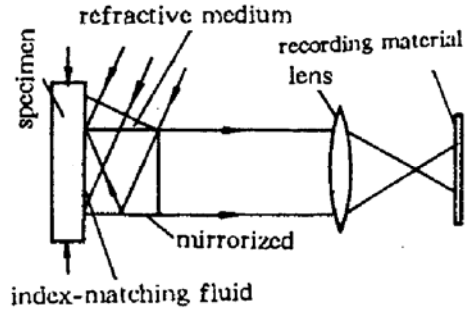


Fig. 4 Refractive medium moire interferometry

3 实 验

3.1 制栅实验

实际制栅时，不仅采用图 1 所示光路，还可以用图 5 所示光路。为了充分利用光能，匹配液采用折射率值足够高且不与记录介质光刻胶发生化学反应的二甲苯溶液，使记录介质涂布在匹配液和基片之间而不是基片背面。基体材料为普通玻璃薄片，折射率介质为 K₂O 玻璃 ($n = 1.5163$)，记录介质采用美国 Shipley 公司生产的 AZ-1400 型正光刻胶，光源用氩离子激光器输出的波长为 457.9 nm 的蓝光。

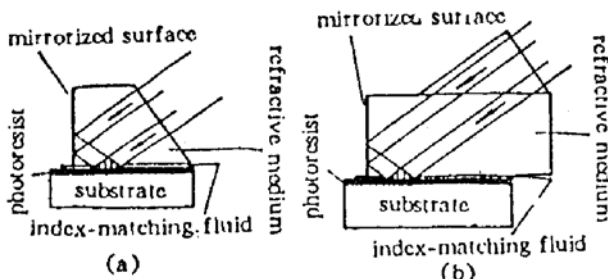


Fig. 5 Grating fabrication by refractive medium

在玻璃基片上制作全息光栅应在多次试验的基础上选择合适的甩胶厚度、曝光时间和显影液浓度等因素，才能得到高质量的全息光栅。作者在实验中已制得各种频率的全息光栅。栅线频率在 3000 1/mm 以内的光栅最大尺寸为 80 mm × 80 mm， ± 1 级的衍射效率为 40%；栅线频率在

3000 1/mm ~ 5000 1/mm 的光栅尺寸为 20 mm × 20 mm，光栅质量的好坏和衍射效率的高低主要通过扫描电子显微镜观察判断。图 6 是四种频率光栅的扫描电镜照片。光栅频率分别为 1200 1/mm(正交)，4000 1/mm(正交)、4500 1/mm(单线)和 5300 1/mm(单线)。

3.2 介质云纹干涉法实验

本文以测量对径受压圆盘的 u 位移场作为折射率介质云纹干涉法的验证。试件材料为铝，直径 25 mm，厚度 5 mm，受力方向类似图 4 所示，试件表面复制有 600 1/mm 的正交位相型反射光栅，匹配液用蛙油 ($n = 1.62$)，折射率介质为重火石玻璃 ($n = 1.74$)，光源仍为氩离子激光器的蓝色光。图 7(a) 为采用图 3 所示光路 ± 1 级衍射光的云纹干涉条纹图，图 7(b)

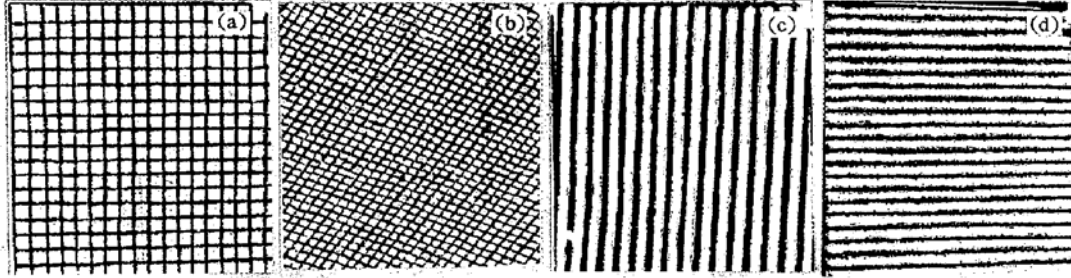


Fig. 6 SEM of gratings

为采用介质法 ± 5 级衍射光的干涉条纹图，图 7(b) 仅示出图 7(a) 的右边部分。通过测量两图中沿 x 轴条纹级数与半径的关系可以看出，位移场条纹倍增为原来的 5 倍，测量灵敏度也提高了相应的倍数。

小 结 本文将折射率介质分别应用于全息制栅和云纹干涉法光路中，用介质中传播的光束取代空气中传播的光束，从而得到栅线密度为 5000 1/mm 的高频全息光栅和 ± 5 级衍射级次相干涉形成的云纹干涉条纹图。这两项技术的实现为细观力学的实验研究开拓了新思路。

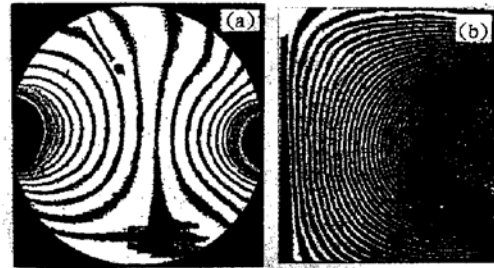


Fig. 7 u displacement field of disk in compression (a) diffraction order ± 1 (b) diffraction order ± 5 (right part of Fig. 8(a))

参 考 文 献

- [1] 姚可夫， 裂纹尖端塑性变形的微观与细观观察。清华大学博士学位论文，1989，4：54~77
- [2] J. D. Briers, The interpretation of holographic interferogram. *Opt. Quant.*, 1976, 8(4): 469~476
- [3] K. A. Stetson, A review of speckle photography and interferometry. *Opt. Engng.*, 1975, 14(5): 482~489
- [4] D. Post, Development in moire interferometry. *Opt. Engng.*, 1982, 21(3): 458~467

Applications of Refractive Medium Technique in Grating Fabrication and Moire Interferometry

Zhang Yunxiang Shi Ling Dai Fulong

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 15 March 1994; revised 30 May 1994)

Abstract The wavelength of the light will shorten when it travels in the refractive medium. Based on this property, a technique for fabricating high frequency holographic gratings is developed. It makes the grating frequency breakthrough the theoretical limit of $2/\lambda$. The refractive medium is also used in the moire interferometry. When the frequency of specimen grating is 600 lines/mm, the frequency of virtual grating will reach up to 6000 line/mm and the fringe pattern of ± 5 diffraction order can be obtained with the measuring sensitivity enhanced from $0.83 \mu\text{m}$ to $0.16 \mu\text{m}$.

Key words refractive medium, holographic grating, moire interferometry, sensitivity.