

调制边缝位相的全息三缝干涉仪

王 丁 肖桂遐

(重庆大学应用物理系 630044)

摘要: 本文介绍了调制一条边缝光路位相的全息三缝干涉仪。其量程比调制中缝位相的三缝干涉仪扩大一倍,并能对大范围的连续光程变化进行测量。

关键词: 全息三缝干涉仪,调制边缝位相,空间频谱

Holographic three-slit interferometer for modulating phase of one lateral slit

Wang Ding, Shiao Guixia

(Department of Appl. Phys., Chongqing University, Chongqing)

Abstract: A holographic three-slit interferometer is described in which the phase of one lateral slit is modulated. The measurement range of this apparatus is one time large than the ordinary three-slit interferometer. It can measure continuous light path changes in a wide range.

Key words: holographic three-slit interferometer, modulation of phase of one lateral slit, spatial diffraction spectrum

三缝干涉仪的主要特点之一是通过测量三缝衍射空间频谱极值光强的相对大小来测量光路中的光程变化^[1,2]。激光光源和光电二极管阵列探测器的使用使三缝干涉仪能简单地进行定量测量,并具有高的测量精确度。利用全息术做成的全息三缝干涉仪简化了光路,用起来更为方便^[3]。但是,以前介绍的各种三缝干涉仪都是调制中缝光路位相,其量程为 $\pm 1/4$ 波光程长变化。人们自然希望能扩大其量程而应用到更多的领域。本文介绍的调制一条边缝位相的全息三缝干涉仪实现了扩大量程到 $\pm 1/2$ 波长光程变化,并能对大范围连续光程变化进行测量。

一、干涉仪的理论

考虑图 1 中的三缝干涉仪。它与一般三缝干涉仪不同之处在于位相物体 B 和位相补偿器 O 是放在一条边缝的光路中而不是放在中缝光路中。按照图 1 中的几何布置,在透镜 L 后焦平面上 P 点的光场复振幅是

$$\vec{E} = \vec{E}_0 [1 + \exp(i\delta) + \exp(i2\delta + \alpha)] \quad (1)$$

其中 \vec{E}_0 是单缝衍射因子,可近似为常量。 δ 由下式决定:

$$\delta = (2\pi/\lambda) b \sin \theta \quad (2)$$

其中 λ 是光波波长; b 是缝间距; θ 是狭缝平面的法线与 P 点对应的狭缝衍射光线之间的夹角; x 是一条边缝光路中的位相物体 B 和位相补偿器 C 引入的位相。

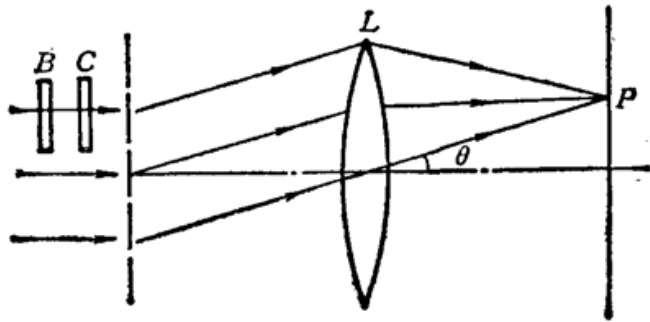


Fig. 1 Holographic three-slit interferometer for modulating phase of one lateral slit

为了分析衍射谱分布,我们要找出各极值点的位置。它们显然应满足条件:

$$\partial I / \partial \delta = 0. \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式,得到

$$2 \sin\left(\delta + \frac{x}{2}\right) \cos \frac{x}{2} + 4 \sin\left(\delta + \frac{x}{2}\right) \cos\left(\delta + \frac{x}{2}\right) = 0. \quad (6)$$

于是极大值点的位置是

$$\delta = -\frac{x}{2} + k\pi, \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

从(7)式看出,当 $x=0$ 时, $\delta = k\pi$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 这就是无位相调制的一般三缝衍射谱的情况。当物体 B 和位相补偿器 C 在一条边缝光路中引入一有限位相 x 时,每个极大值的位置都平移一相同距离 $\delta = -x/2$ 。

把(7)式代入(4)式得到各极大值光强为

$$I = I_0 \left(5 \pm 4 \cos \frac{x}{2} \right) \quad (8)$$

其中当 $k=0$ 和偶数时括号内取正号, k 为奇数时取负号。于是两相邻极大值,例如 $\delta = -x/2$ 和 $\delta = \pi - x/2$ 处的光强分别为

$$I_1 = I_0 [5 + 4 \cos(x/2)] \quad (9)$$

$$I_2 = I_0 [5 - 4 \cos(x/2)] \quad (10)$$

且

$$M = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{4}{5} \cos \frac{x}{2}. \quad (11)$$

设位相补偿器 C 引入位相为 π , 物体 B 有一小位相 s , 即 $x = \pi + s$, 则有

$$M = \frac{4}{5} \sin s. \quad (12)$$

当 $s \ll 1$ 时,

$$M = \frac{2}{5} s \text{ 或 } s = \frac{5}{2} M. \quad (13)$$

从以上分析看出,一条边缝光路中物体 B 的位相变化 s 可以通过测量衍射谱中两相邻极大值光强之和与差的比,由公式(12)或(13)求出。 s 的测量范围是 $\pm\pi$ 。另外, s 变化时,各极

用(1)式乘其复共轭得到 P 点的光强为

$$\begin{aligned} I &= \vec{E} \cdot \vec{E}^* \\ &= I_0 [3 + 2 \cos \delta + 2 \cos(\delta + x) \\ &\quad + 2 \cos(2\delta + x)], \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $I_0 = \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0^*$ 。利用三角函数和差公式可把(3)式写成

$$\begin{aligned} I &= I_0 \left[1 + 4 \cos^2 \left(\delta + \frac{x}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + 4 \cos \left(\delta + \frac{x}{2} \right) \cos \frac{x}{2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

大值除大小变化以外，位置也要变化。这一特点可以用来测量大范围的连续光程变化。当然这种量程的扩大是与其灵敏度比中缝位相调制的三缝干涉仪下降一半为代价的。在一些实际应用中允许这种灵敏度下降。

二、全息干涉仪的原理

调制一条边缝位相的全息三缝干涉仪与调制中缝位相的全息三缝干涉仪十分类似^[3]。图 2 是这种干涉仪的原理图。把狭缝 S 分别位于 1 和 2 处时的平行光束 B 经 S 的衍射光波前用参考光束 R 以二次曝光法记录在全息片 H 上。在处理和复位全息片 H 以后，用同一参考光束作为再现光照射全息片 H ，在全息片 H 后面重建出狭缝 S 在位置 1 和 2 处时的衍射波前。同时把狭缝 S 平移到位置 3，让 1、2、3 三个位置是等间距的。经过位于 3 处的狭缝 S 的衍射光直接透过全息片 H ，在 H 后面作为一边缝衍射波与 R 重建的另外两缝的衍射波一道组成三缝衍射波前；它们透过透镜 L 并在其后焦平面上形成三缝衍射频谱。在物光束 B 中的待测物体的位相变化可以通过测量此衍射谱中两相邻极大值光强，由(12)或(13)式求出。

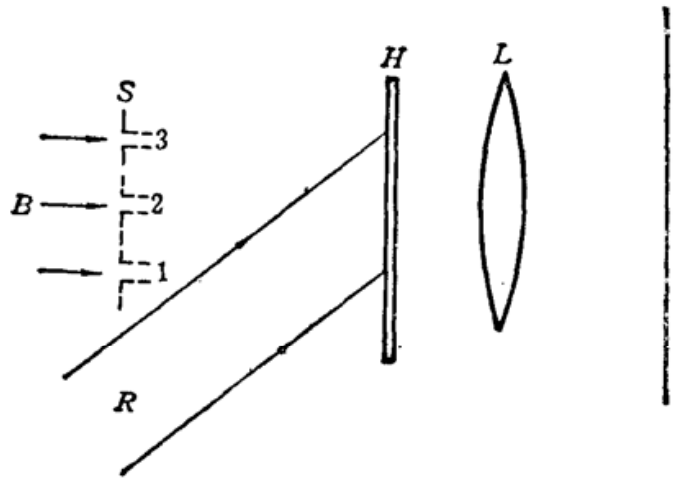


Fig. 2 Principle of holographic three-slit interferometer

由于采用了全息术，三缝中的一边缝与另外两缝的光路显著分开。从光路上看，已等效于两光束干涉仪，使用较为方便。光束 B 和 R 的获得及其光强比的调节可照 [3] 中的方法进行。最后值得指出的是，实际上 H 是一个可长期使用的全息元件，不需每次测量都去制作。

三、实 验

图 3 中的照片是用光电二极管阵列采得的各种空间频谱分布。图 3(a) 是一条边缝的衍射谱。图 3(b) 是由参考光重建的另两条缝的衍射谱。图 3(c)~(e) 是由上面两波谱相干叠加形成的三缝衍射谱。图 3(c) 是一边缝受到 π 位相调制的三缝衍射谱，图 3(d) 是一边缝受到 $\pi + \epsilon$ 位相调制的情况，图 3(e) 是一边缝受到 2π 位相调制的情况。这些照片表示出的两相邻极大值的相对大小和位置随边缝位相调制的变化与第 I 节中的理论符合。照片中表现出的良好的相干叠加性说明用全息方法产生一部分狭缝的衍射波前是可行的。实验表明，这种干涉仪有较稳定的输出和良好的重复性。这些特点有利于该仪器的实际应用。

调制边缝位相的全息三缝干涉仪可能成为一种使用方便的定量测量干涉仪。其量程是 $\pm\pi$ 位相或 $\pm 1/2$ 波长光程变化。它可以用来对大范围连续光程变化进行测量。其最大测量精确度是调制中缝位相的三缝干涉仪的一半。

(下转第 582 页)

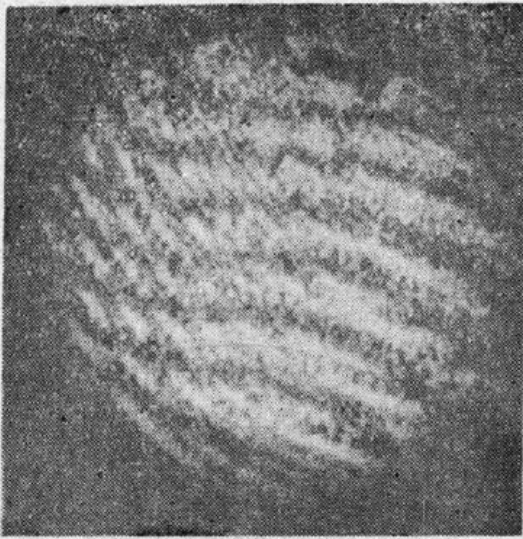


Fig. 9 Interferogram of the tested concave mirror

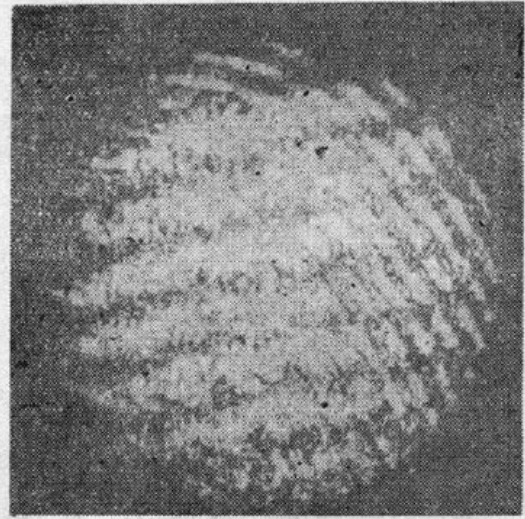


Fig. 10 Interferogram of the tested objective lens by autocollimation

干涉条纹的噪音较大。针对上述原因,降低噪音提高条纹对比度是可能的。

本全息干涉系统的误差分析,类似于文献[4],不再赘述。

作者感谢 Mr O. M. Chidley 在实验中的友好帮助。第一作者对澳大利亚 CSIRO 在他访问期间给予的资助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 A. B. Зензинов, A. A. Щетняков, *Опт. и спектр.* **56**(4), 712~714(1984)
- 2 A. A. Городецкий *et al.*, *ОМП*, (12), 53~54(1983)
- 3 Zou Zhenshu *et al.*, *Proc. SPIE*, **673**, 268~271(1987)
- 4 Zhou Wanzhi *et al.*, *Proc. SPIE*, **673**, 289~291(1987)
- 5 W. H. Steel, *Interferometer*, 2th ed. Camb Univer. Press, 1983, 201
- 6 Г. В. 柯略帕洛娃, Л. Т. 浦连耶夫, *光学系统的研究与检验*, 机械工业出版社, 北京, 1983, 221

(上接第 585 页)

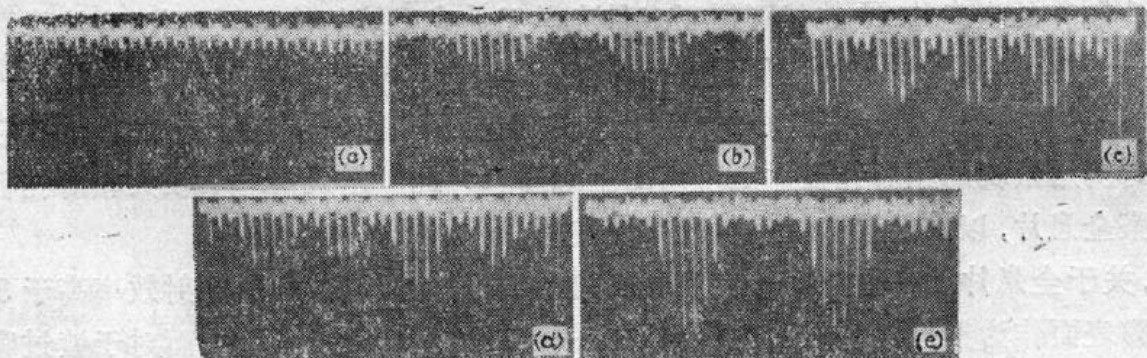


Fig. 3

- (a) Diffraction spectrum of one lateral slit; (b) Reconstructed diffraction spectrum of the other two slit; (c) Three-slit diffraction spectrum for π phase modulation of the lateral slit; (d) Three-slit diffraction spectrum for $\pi + \epsilon$ ($0 < \epsilon < \pi$) phase modulation of the lateral slit; (e) Three-slit diffraction spectrum for 2π phase modulation of the lateral slit

参 考 文 献

- 1 F. Zernike, *J. Opt. Soc. Am.*, **40**, 326(1950)
- 2 A. Marechel *et al.*, A Precision Interferometer with High Light-Gathering Power, in "Advanced Optical Technique, ed. by A. B. S. Van Heel, pp. 437~438 (North-Holland Amsterdam, 1967)
- 3 Ding Wang, Tang-go Chen, *Appl. Opt.*, **27**, 1298(1988)