单次曝光显微剪切全息干涉仪

陈守华　徐毓光

（中国科学院上海光机所）

提要：本文所介绍的干涉仪具有全息记录光路简单、自动保证基本等光程、所记录的波前可以在不同的参考背景中复现等项特点，适用于有很高时空分辨要求的干涉测量。

Single-exposure holographic shearing microinterferometer

Chen Shouhua　Xu Yuguang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The interferometer introduced in this paper has such properties as simple optical arrangment for holographic recording, automatic insurence of the optical path quality and reproducibility of recoded wavefronts in different reference background. It can be applied to interferometry with high temporal and spatial resolution requirements.

三平板剪切干涉仪具有稳定、等光程、调整方便等优点。在三平板剪切干涉仪上附加显微光路，并使波面结构以全息方式记录，便得到显微剪切全息干涉仪，它兼有三平板剪切干涉和全息干涉的优点。

显微剪切全息干涉仪的结构光路如图1所示。以单模 He–Ne 激光束聚焦照明待测物 T，经显微物镜 M 放大后成象于 H 平面。全反射镜 A、B 和半反平板 C 组成三平板剪切干涉。C 板将入射光束分成二路，分别依顺时针及逆时针方向在 A、B、C 回路中循环一圈后到达 H 平面。不论三平板相对位置如何变动，出射后的二路光束的波场只有一个横向平移。平移量（包括大小及方向）可以连续调整。设待测物 T 尺寸有限，其在 H 平面上的象限于半径为 R 的圆区域内，在 H 平面上的波场分布与图2所示等效。与 H 平面相距 l 的二个点源 S_1、S_2 分别与二路光束对应，它们之间有横向平移 $\boldsymbol{d}=(dx,\ dy)$，Ω_1 和 Ω_2 分别是二路光束的成象区域。在 H 平面上建立 x_1-y_1 坐标，取 Ω_1 中心为坐标原点，把平移量调到足够大，使 $|d|>2R$。于是，H 平面上的总波场是：

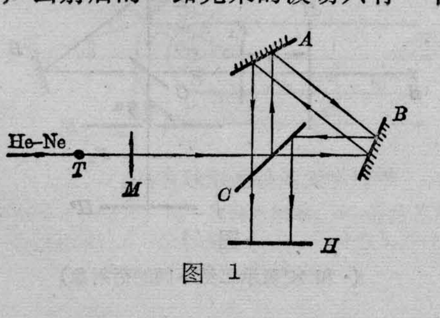


图 1

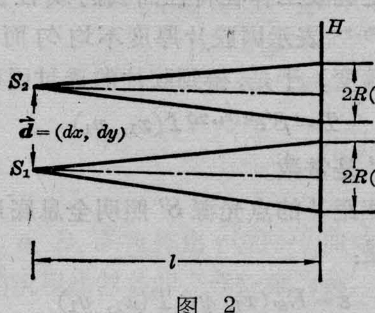


图 2

收稿日期：1979年9月28日。

$$E(x_1,\ y_1)=\begin{cases} E_S(x_1,\ y_1)t(x_1,\ y_1)e^{i\phi(x_1,y_1)}+E_S(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)\,(\Omega_1) & (1.1)\\ E_S(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)t(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)e^{j\phi(x_1-dx_1,y_1-dy_1)}+E_S(x_1,\ y_1)\,(\Omega_2) & (1.2)\\ E_S(x_1,\ y_1)+E_S(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)\quad (\text{其余区域}) & (1.3)\end{cases}$$

式中 $E_S(x_1,\ y_1)=E_0\exp\left[\frac{i\pi}{\lambda l}(x_1^2+y_1^2)\right]$是发自点源 S_1 的球面波场；$t(x_1,\ y_1)e^{i\phi(x_1,y_1)}$ 是经显微物镜 M 放大后的 T 的透过函数。

(1.3)式是二球面波在 H 平面上剪切相干，它形成与平移 $\boldsymbol{d}$ 垂直的直条纹，条纹频率 $\nu\approx\frac{|d|}{l\lambda}$，这就是全息记录的载频。举一个实用的例子，取 $|d|=2R=40$ 毫米，$l=2\times10^3$ 毫米，$\lambda=0.6\times10^{-3}$ 毫米，则 $\nu=32$ 毫米，载频很低，可以用普通胶卷记录。

(1.1)式和(1.2)式表明，T 的透过函数 $t(x_1,\ y_1)\,e^{i\phi(x_1,y_1)}$ 以两种不同的方式分别记录在 Ω_1 和 Ω_2 区域内。在 H 平面放上胶卷，曝光一次，就得到一张单次曝光全息图。

为简单起见，以下只讨论 Ω_1 内全息图的复现，Ω_2 的讨论完全一样。

用单次曝光全息图准确复现波前的主要困难在于胶片厚度不均匀所带进的位相畸变。单次曝光后胶片上的光强 $I(x_1,\ y_1)$ 可写为：

$$I(x_1,\ y_1)=|E_S(x_1,\ y_1)t(x_1,\ y_1)e^{i\phi(x_1,y_1)}+E_S(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)|^2 \quad (2)$$

假定乳胶工作在特性曲线的线性区域，并用 $e^{i\xi(x_1,y_1)}$ 表示因胶片厚度不均匀而引进的位相畸变。于是，得到胶片的透过函数是：

$$T=\beta' e^{i\xi(x_1,y_1)}I(x_1,\ y_1) \quad (3)$$

其中，β' 是常数。

用相距 l' 的点光源 S' 照明全息底片，透射波面是：

$$\begin{aligned}\varepsilon&=E_{S'}(x_1,\ y_1)\,T(x_1,\ y_1)\\&=\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3+\varepsilon_4\end{aligned}$$

其中

$$\varepsilon_1=\beta' E_0^2 E_{S'}(x_1,\ y_1)e^{i\xi(x_1,y_1)} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_2=\beta' E_0^2 t^2(x_1,\ y_1)E_{S'}(x_1,\ y_1)e^{i\xi(x_1,y_1)} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_3=\beta' E_S(x_1,\ y_1)E_S^*(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)\\ \times E_{S'}(x_1,\ y_1)t(x_1,\ y_1)e^{i\phi(x_1,y_1)}e^{i\xi(x_1,y_1)}\end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_4=\beta' E_S^*(x_1,\ y_1)E_S(x_1-dx_1,\ y_1-dy_1)\\ \times E_{S'}(x_1,\ y_1)t(x_1,\ y_1)e^{-i\phi(x_1,y_1)}e^{i\xi(x_1,y_1)}\end{aligned} \quad (4.4)$$

而 $E_{S'}(x_1,\ y_1)=E_0\exp\left[\frac{i\pi}{\lambda l'}(x_1^2+y_1^2)\right]$ 是发自 S' 的球面波场。

显然，因为 $|\varepsilon_3|^2=|\varepsilon_4|^2=Bt^2(x_1,\ y_1)$（$B$ 是常数），所以，它们给出 T 的影象。另外(4.3)式和(4.4)式中所载有的信息除了 $t(x_1,\ y_1)e^{i\phi(x_1,y_1)}$ 之外，尚有由胶片厚度起伏带进的相位畸变项 $e^{i\xi(x_1,y_1)}$，$e^{i\xi(x_1,y_1)}$ 的影响必须消除。

我们先来研究图3的光路。将一焦距为 f 的凸透镜放在三平板机构的输出端，因为无穷远的物点发出的光线可视为一束平行光，经三平板干涉仪横向平移后，在透镜 F 的焦点处仍只成一点象，并不产生横向剪切。所以，用图4所示的机构复现单次曝光全息图可以完全消除 $e^{i\xi(x_1,y_1)}$ 的影响。

图中，S 是复现点光源，H 是单次曝光全息图，透镜 F_1 将 H 成象于无穷远处，S 的

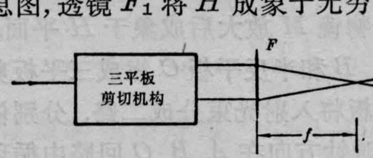


图 3

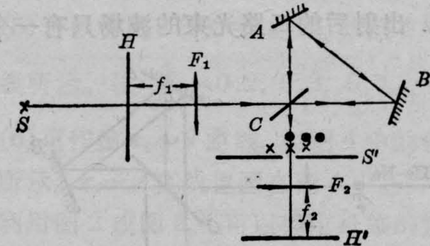


图 4

（· 和 × 表示二组不同的衍射象）

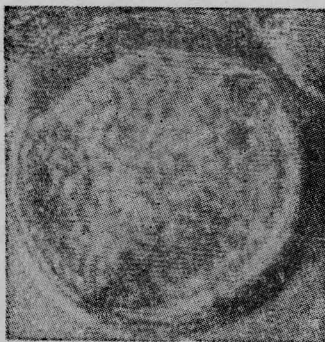
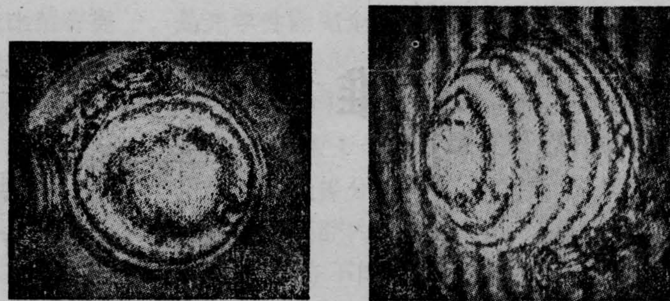
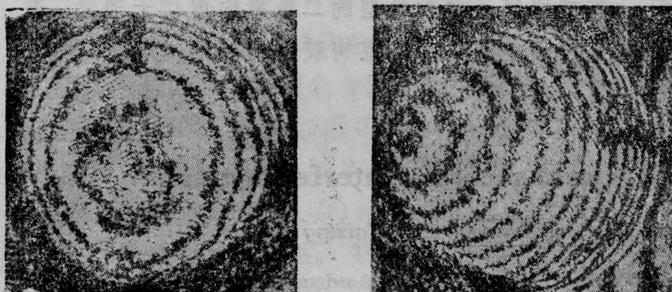


图 5



(a) (b)

图 6



(a) (b)

图 7

图 8

衍射象在 S' 平面。A、B、C 是三平板剪切机构，它使在 S' 平面上有二组衍射象。若使某组零级衍射象与另一组的一级衍射象相重，则在透镜 F_2 的焦平面 H' 处$[(x_2-y_2)]$平面的强度是：

$$I(x_2,\ y_2)=\beta^2\left|1+t^2(x_2,\ y_2)+t(x_2,\ y_2)e^{i\phi(x_1,\ y_1)}\right|^2 \qquad (5)$$

可见 $e^{i\xi(x_2,\ y_2)}$ 的影响已完全消去，所得到的干涉条纹完全由 T 的透过函数的位相部分确定。另外，若使某组的 $+1$ 级衍射象与另一组的 -1 级衍射象相重，干涉灵敏度可提高一倍，此时：

$$I(x_2,\ y_2)=\beta^2t^2(x_2,\ y_2)\left|1+e^{2i\phi(x_1,\ y_1)}\right|^2。 \qquad (6)$$

通过微调三平板位置，在不同的参考条纹背景中观察 T 的波面，由此可以判断弧岛型条纹的干涉级数及详察波面的细结构。

我们用上述方法拍摄了玻壳微球单次曝光全息图。玻壳球的直径约 60 微米，壳厚约 0.5 微米，显微放大约 400 倍。图 5 是该玻壳球的单次曝光全息图。图 6(a) 是以零级和 1 级衍射象相重所得到的干涉图；图 6(b) 是当零级和 1 级衍射象稍有错开时的干涉图，它相当于加背景条纹后的干涉图样。单次曝光全息图复现的优越性在这里可以看得很清楚，不仅可以判断环形条纹的级数，而且可以看到局部（如玻壳处）波面的突变。图 7(a) 是 $+1$ 级和 -1 级相重合的干涉环图，图 7(b) 是变换背景后的干涉图样。

按前面的分析，为了消除胶片厚度不均匀对波面畸变的影响，必须将图 4 中的 H 调在 F_1 的前焦面处，否则物体 T 的位相函数 $e^{i\phi(x_1,\ y_1)}$ 几乎完全湮没于波面畸变 $e^{i\xi(x,\ y)}$ 之中，正如图 8 所示。