

# 非相干光全息术改善全息显微象质

羊国光 张静娟 左 健  
(中国科学技术大学研究生院)

## 提 要

本文发展了一种用空间非相干光记录象平面的全息图, 并采用白光再现的全息显微术。本方法大大抑制了再现象的噪声, 改善了全息显微象质, 同时不影响象的分辨率。并且可以记录具有深度信息的显微物体。

## 一、引 言

全息显微术与通常的显微镜相比, 具有独特的优点。显微镜具有很高的横向放大率, 但这是以小的景深作为代价的。而全息显微术以具有保存显微物体的三维信息以及位相信息的能力而引人注目。

但至今为止, 全息显微镜还没有成功地广泛使用, 其主要困难在于全息象的分辨率与成像质量问题<sup>[1]</sup>。全息显微术在记录与再现时都用相干光照明, 便不可避免地在全息再现象上存在着严重的相干噪声。对于相干光系统, 这种来自物面及光学系统中的噪声, 在象面上迭加在一起, 致使大大降低了再现象的信噪比。就象质而言, 它不能与通常的显微象相匹敌。因此, 如何改善全息显微象质是一个值得研究的问题。

已有一些人研究过减小全息象的噪声的方法。Martienssen 与 Spiller<sup>[2]</sup> 在一干板上并排照几张全息图, 每个全息图所对应照明的毛玻璃位置不同, 然后将这些全息图进行非相干迭加。这种方法可以抑制噪声, 但实际运用不方便。Caulfield<sup>[3]</sup> 在一块干板上多次曝光, 记录下九个不同随机照明的独立全息图, 然后进行相干光再现。显然, 这是不可能消除相干噪声的。Yu 和 Wang<sup>[4]</sup> 在再现过程中对全息图进行随机空间抽样, 散斑的减少是以降低象的分辨率为代价的。

近年来, Cox 与 Vahala<sup>[5]</sup> 用相干光记录象平面全息图, 并用白光再现的方法消除全息显微象在再现过程中出现的噪声。可以想象, 这种改善是有限的。Budhiraja 与 Som<sup>[6]</sup> 利用全息法制作多方向位相光栅作为漫射体, 然后连续迭加各个子通道全息图的方法, 来改善显微象质。Courjon 与 Bulabois<sup>[7]</sup> 用全息光学元件作为分束器进行白光全息显微, 但实验结果表明, 象的分辨率显然降低了。

Leith 与羊国光<sup>[8]</sup> 曾发展了一种空间非相干光记录全息图的方法, 相当有效地压制了全息图的噪声。本文将这种方法用于全息显微术中, 并用空间非相干光记录象平面全息图, 然后以白光再现。这对抑制噪声并改善象质将更为有效, 同时不致降低分辨率。本文用这种方法进行了实验, 得到了较为满意的结果。

## 二、原 理

用空间非相干光来记录全息图,可以达到抑制噪声的目的。扩展光源上每一发光单元发出的光是从不同的通道经过光学系统,所以,其输出是不同通道上的非相干迭加。不同通道上输出的信号是完全相关的,但在不同通道上的噪声却是不相关的。结果,信号在输出平面上得到相加,而噪声却趋于平均掉。因此,在光学系统中由于运用空间非相干光照明,而引入一定的冗余度后,将显著地提高输出的信噪比<sup>[9]</sup>。

那么,问题是如何用非相干光获得对比度足够的条纹,以记录全息图?我们知道,这相当于在剪切干涉仪中使用扩展光源。这时在两束光相交的区域,随着光源尺度由小变大,干涉条纹逐步地由非定域变为定域条纹。

当取适当大小的光源时,条纹仍可保持足够好的对比度。在定域面上放置全息底片,即可记录下非相干全息图。

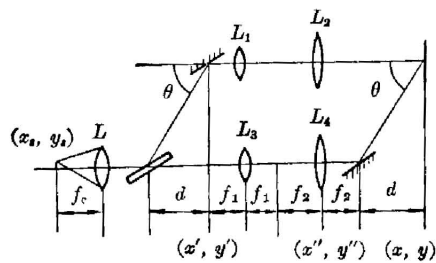


图1 计算用扩展光源形成定域条纹的光学系统

Fig. 1 Optical system for calculating localized fringe using extended source

这可用以下的数学计算来分析。为便于计算,采用图1的光学系统,其中分束器与两面反射镜均相互平行。为简单起见,只讨论一维情况,光源为沿  $x$  方向扩展的非相干光源。显然,这不难推广到二维情况。先讨论两束平行光的干涉,暂不考虑在一束中放入物体。设  $x_s$  为扩展光源上的任一点,则入射在分束器上的倾斜平面波为  $\exp[i2\pi\alpha_x x]$ , 这里  $\alpha_x = x_s/\lambda f_c$ ,  $f_c$  为准直透镜  $L$  的焦距。由分束器及反射镜引起光束的

倾角为  $\theta$ , 取  $\alpha = \sin\theta/\lambda$ 。这时,一束光到达相交平面  $x$  的光场为

$$\begin{aligned}
 U_1(x) = & \exp[-i\pi\lambda d\alpha_x^2] \cdot \exp[-i\pi\lambda f_1\alpha_x^2] \cdot \iint \exp[i2\pi\alpha_x x'] \\
 & \cdot \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda f_1} x'^2\right] \cdot \exp\left[i\frac{\pi(x'-x'')^2}{\lambda(f_1+f_2)}\right] \cdot \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda f_2} x''^2\right] \\
 & \cdot \exp[i2\pi\alpha_x x''] \cdot \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x''-x)^2\right] dx' dx'', \quad (1)
 \end{aligned}$$

同样,另一束为

$$\begin{aligned}
 U_2(x) = & \exp[-i\pi\lambda d(\alpha_x + \alpha)^2] \cdot \exp[-i\pi\lambda f_1\alpha_x^2] \\
 & \cdot \iint \exp[i2\pi\alpha_x x'] \cdot \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda f_1}(x'-\lambda d\beta)^2\right] \cdot \exp\left[i\frac{\pi(x'-x'')^2}{\lambda(f_1+f_2)}\right] \\
 & \cdot \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda f_2}(x''-\lambda d\beta)^2\right] \cdot \exp\left[i\frac{\pi(x''-x)^2}{\lambda d}\right] dx' dx'', \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中  $\beta = \text{tg}\theta/\lambda$ ,  $f_1$  与  $f_2$  分别为透镜  $L_1$  与  $L_2$  的焦距,  $\lambda d\beta$  这一项的引入是由于分束器对光束的反射而引起坐标原点的平移。

经积分后, (1) 式为

$$\begin{aligned}
 U_1(x) \propto & \exp[-i\pi\lambda d\alpha^2] \cdot \exp[-i\pi\lambda f_1\alpha_x^2] \cdot \exp[-i\pi\lambda d\alpha_x^2] \\
 & \cdot \exp\left[-i\pi\lambda d \frac{f_1^2}{f_2^2} \alpha_x^2\right] \cdot \exp\left[i\pi\lambda \frac{f_1(f_1+f_2)}{f_2} \alpha_x^2\right] \\
 & \cdot \exp\left[i2\pi\lambda d \frac{f_1}{f_2} \alpha\alpha_x\right] \cdot \exp\left[-i2\pi \frac{f_1}{f_2} \alpha_x x\right] \cdot \exp[i2\pi\alpha x]。
 \end{aligned} \quad (3)$$

在我们的系统中,一般  $\theta < 15^\circ$ , 故可取  $\text{tg } \theta \sim \sin \theta$ , 即  $\beta \sim \alpha$ 。这样(2)式经积分后为

$$\begin{aligned}
 U_2(x) \propto & \exp[-i\pi\lambda d\alpha^2] \cdot \exp[-i\pi\lambda f_1\alpha_x^2] \cdot \exp[-i\pi\lambda d\alpha_x^2] \\
 & \cdot \exp\left[-i\pi\lambda d \frac{f_1^2}{f_2^2} \alpha_x^2\right] \cdot \exp\left[i\pi\lambda \frac{f_1(f_1+f_2)}{f_2} \alpha_x^2\right] \\
 & \cdot \exp\left[i2\pi\lambda d \frac{f_1}{f_2} \alpha\alpha_x\right] \cdot \exp\left[-i2\pi \frac{f_1}{f_2} \alpha_x x\right],
 \end{aligned} \quad (4)$$

则在平面  $x$  处干涉场分布为

$$I(x) = |U_1 + U_2|^2 \propto \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi\alpha x)。 \quad (5)$$

注意在(5)式中干涉场分布与参量  $\alpha_x$  无关, 即干涉场与光源的位置无关。也就是说, 运用扩展光源可以在两光束相交平面上获得定域条纹。

如在光路中放入物体  $O(x', y') = a(x', y')e^{i\phi(x', y')}$ , 由于它经过透镜  $L_1, L_2$  成象在  $(x, y)$  平面上, 故它也与光源的位置无关。因此, 可记录到非相干全息图

$$I_0(x) = |U_1 + U_2|^2 \propto |a|^2 + |A|^2 + 2Aa \cos[2\pi\alpha x - \phi(x, y)], \quad (6)$$

其中  $A$  为参考光束的振幅。为避免在再现过程中重新引入相干噪声, 我们采用以扩展白光光源再现的象平面全息图。众所周知, 再现象的最小可分辨尺寸  $\Delta S$  与照明光源直径  $\Delta r$  之间的关系是<sup>[10]</sup>

$$\Delta S = (z_1/z_r) \Delta r, \quad (7)$$

其中  $z_1$  是再现象到全息图的距离,  $z_r$  是照明光源到全息图的距离。如  $z_1 \rightarrow 0$ , 则  $\Delta S \rightarrow 0$ 。即用扩展光源照明, 在象平面上不损失其分辨率。另一方面, 如  $z_r$  取较大值 ( $z_r \gg z_1$ ), 相当于用准直光源照明, 即使  $\Delta r \neq 0$ , 也可使  $\Delta S \rightarrow 0$ 。这就是说, 对于有一定景深的物体, 也可以有足够好的分辨率。因此, 象平面全息图用非相干光源再现, 可以显示显微物体的三维结构。

### 三、实验方法与结果

全息显微术通常有预先放大 (premagnification) 与事后放大 (postmagnification) 两种方法。本文在记录时采取预先放大 (倍率为  $5\times$ ), 再现时用显微镜二次放大的工作方式。实验装置如图 2 所示, He-Ne 激光输出经过用马达带动的转动毛玻璃调制后, 形成空间非相干光源。在物束中放置显微样品  $O$ , 经透镜  $L_1$  与  $L_2$  预放大后, 成象于平面  $P$ 。同时, 调整参考束的方向, 使其与物束相交于象平面  $P$ 。当逐渐从左向右移动转动毛玻璃的位置, 使扩展光源的尺寸逐步增大, 则在平面  $P$  附近的条纹也逐步由非定域变为定域条纹, 并且条纹对比度逐渐下降。当准直镜  $L$  的焦距为 240 mm,

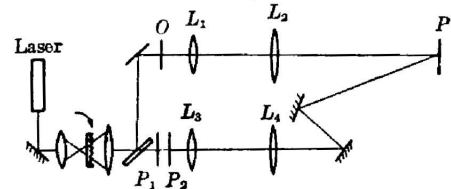


图 2 用空间非相干光记录全息的光学系统

Fig. 2 Optical system for recording hologram using spatial incoherent source

光源尺寸扩展到 1.5 mm 时(即光源的张角为 6.25 mrad), 仍可得到对比度足够好的条纹。而如果光源张角不大于 0.03 mrad, 则在物孔径上可获得足够的空间相干性。因此, 这时相

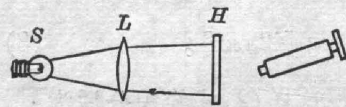


图 3 白光再现装置

Fig. 3 Reconstruction set-up with white light

当于光源扩展了  $4 \times 10^4$  因子, 使本系统获得了足够的冗余度。

再现时(如图 3)采用 6 V, 15 W 钨丝灯, 经透镜 L 进行粗略地准直, 照明全息片, 然后再通过显微镜第二次放大, 观察样品。

为了比较相干与非相干系统的噪声效应, 在参考光路中放入两片(图 2 中的  $P_1$  与  $P_2$ )偏振片作为噪声板。由于偏振片质量很差, 放入后引起了相当显著的噪声。

为检验本系统的分辨率, 首先用二号鉴别率板为物进行实验。分别用相干光及非相干光记录, 都用白光再现。图 4(a) 为相干光记录的结果, 图 4(b) 为非相干光记录的结果。由图可见, 非相干光记录与再现, 可以得到与相干光记录所达到的相同的分辨率。二号板的最小可分辨单元为  $5 \mu\text{m}$ , 故本系统的分辨率优于  $5 \mu\text{m}$ (总的放大率为  $100 \times$ )。由于手头没有一号鉴别率板, 未能给出分辨率的上限。显然, 非相干系统大大提高了图象的信噪比。

图 5 给出了植物样品——百合花药的全息显微的白光再现现象。图 5(a) 为相干光记录

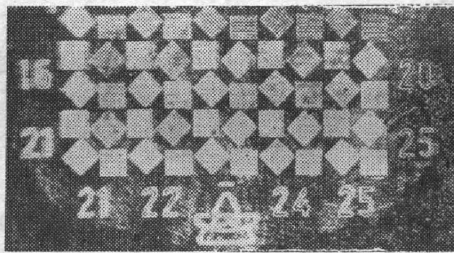


图 4(a) 二号鉴别率板的相干光记录, 白光再现现象

Fig. 4(a) Reconstructed image of hologram of No. 2 resolution target with white light recorded by coherent light

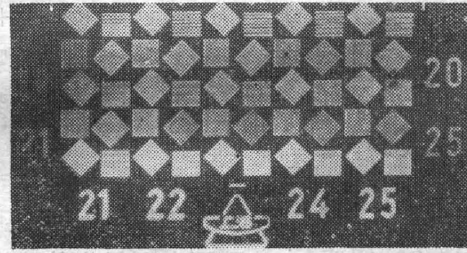
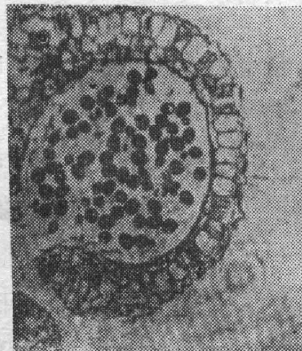
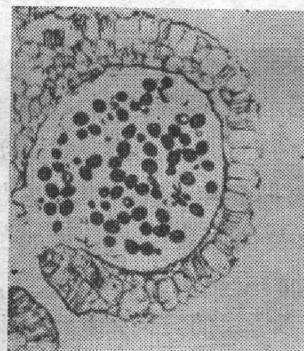


图 4(b) 二号鉴别率板的非相干光记录, 白光再现现象

Fig. 4(b) Reconstructed image of hologram of No. 2 resolution target with white light recorded by spatial incoherent light



(a) recorded by coherent light



(b) recorded by incoherent light

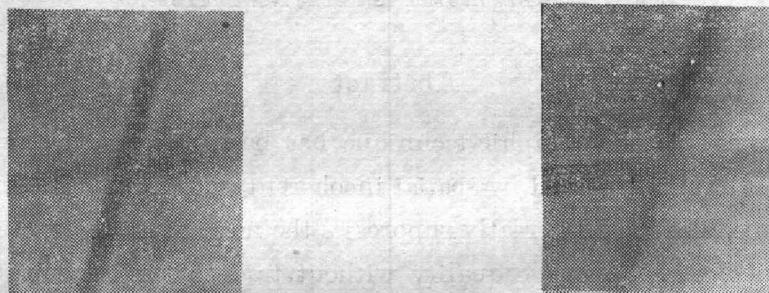
图 5 百合花药的全息显微片的白光再现现象

Fig. 5 Reconstructed image of microscopic hologram of lily anther with white light



的结果。图 5(b) 为非相干光记录结果。总的放大率为  $100\times$ ，图中花粉颗粒大小为  $10\mu\text{m}$  左右。从图中可以看到相干光记录时的噪声是严重的，而这些噪声在用相干光记录时，几乎完全被“洗”去，得到了一幅几乎无噪声的再现象，从而显著地提高了全息显微象的象质。

最后，我们采用两根交叉放置的头发丝，中间间隔一块  $2\text{mm}$  厚的玻璃片，作为有深度信息的样品进行实验。图 6 给出用非相干光记录的放大全息象的再现的照片。其中 (a) 是调焦到上面一根头发丝成象，(b) 是调焦到下面一根头发丝成象。可见，本系统可以记录显微物体的三维信息。



(a) The vertical hair at bottom is in focus (b) The horizontal hair at top is in focus

图 6 在两个不同深度的头发丝的全息再现象

Fig. 6 Photomicrographs of reconstructed image of human hairs at two depths

#### 四、结 论

非相干全息显微术的实验结果表明，与相干光记录相比，它显著地改善了显微再现象的象质，因此，对于低对比物体的记录更为有利。也可以预料，这种系统有利于提高全息显微镜的分辨率。因此，它对全息显微术的发展提供了一种方法。

本方法的缺点是：光路调整较为麻烦，并且由于扩展光源的使用，使条纹对比度降低，导致全息图的衍射效率有所下降。

#### 参 考 文 献

- [1] M. E. Cox; *Handbook of Holography*, (Edited by H. J. Caulfield, Academic press, 1979), 561.
- [2] W. Martienssen, S. Spiller; *Phys. Lett. (A)*, 1967, **A24**, No. 2 (16 Jan), 126.
- [3] H. J. Caulfield; *Opt. Commun.*, 1971, **3**, No. 5 (Jul), 322.
- [4] F. T. S. Yu, E. Y. Wang; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 7 (Jul), 1656.
- [5] M. E. Cox, K. J. Vahala; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 9 (1 May), 1455.
- [6] C. J. Budhiraja, S. C. Som; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 10 (15 May), 1848.
- [7] C. J. Courjon, J. Bulabois; *Opt. Engng*, 1981, **20**, No. 2 (Mar), 233.
- [8] E. N. Leith, G. G. Yang; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 22 (15 Nov), 3819.
- [9] S. L. Zhuang; *Coherence requirement, transfer function and noise performance of partially coherent processing system*, (Ph. D. Thesis, Penn. State University, 1983, Univer. Microfilm, Ann. Arbor, Mich.
- [10] R. J. Collier et al.; *Optical Holography*, (Academic press, 1971).

## Improvement of microholographic image quality using noncoherent holography technique

YANG GUOGUANG ZHANG JINGJUAN AND ZUO JIAN

*(Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing)*

(Received 16 August 1983; revised 23 November 1983)

### Abstract

A noncoherent microholographic technique has been experimentally studied. An image plane hologram is recorded by spatial incoherent source, and it reconstructs with white light source. The method greatly suppresses the noise of reconstructed image and improves microholographic image quality without trade off in image resolution. Also this method can preserve the depth information of micro-object.