

# 基于低相干光平面波照明的数字全息显微测量

卢文龙 游 雾 刘晓军

(华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 提出将基于低相干光平面波照明的离轴数字全息显微方法应用于微纳表面测量,结合角谱算法,可在更近的距离以高分辨率重建由平面波记录的数字全息图.在发光二极管平面波照明全息实验中,通过单幅离轴全息图对标准刻线板进行了强度像和相位像的重建.在重建过程中,未发生频谱重叠的现象.对其三维表面形貌的评定结果显示重建的横向参数值与纵向参数值均与标准值具有很好的一致性.

**关键词** 数字全息;显微镜;表面测量;三维表面形貌;平面波;角谱

中图分类号 TH161 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(2012)04-0046-03

## Digital holographic microscopy illuminated by low-coherent plane waves

Lu Wenlong You Wu Liu Xiaojun

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University  
of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Off-axis digital holographic microscopy in mirco-nano surface measurement was proposed, which was based on the illumination of low-coherent plane wave. Compared with sphere-wave interferometry illuminated by lasers, low-coherent plane-wave interferometry could effectively avoid the influence of freckles and multiple-reflections. Combined with angular spectrum algorithm, digital holograms illuminated by plane wave could be reconstructed with smaller distances and higher resolutions. In the experiment illuminated by LED(light emitting diode)'s plane wave, the intensity-contrast and phase-contrast images of a standard grating plate were reconstructed by a single off-axis hologram. Overlaps did not appear in the frequency spectrum during the reconstructed process. The evaluation of the three-dimensional surface topography reveals that the reconstructed axial and lateral parameters are both in good accordance with their standard values.

**Key words** digital holography; microscopy; surface measurement; three-dimensional surface topography; plane-wave; angular spectrum

数字全息显微术<sup>[1-2]</sup>能实时、非接触、高分辨率地提供被测物体的三维信息,在微纳表面的精密测量、MEMS的振动测量、微粒检测、生物医学等领域引起了广泛关注<sup>[3-6]</sup>.但数字全息图的记录方式与再现方法依然不够成熟,光源选择、重建算法等问题还有待深入研究.本研究针对微纳表面的精密测量,结合离轴数字全息的再现算法,对离轴数字全息显微术的光源和照明方式作了分析与比较,提出一种适合微纳表面精密测量的方案.

## 1 离轴数字全息显微术的原理

离轴数字全息显微术有多种光路配置方案,图1是一种基于迈克尔逊干涉光路的常见方案.图中:BS为普通分光棱镜;QWP为1/4波片;P为起偏器;CL为准直镜;NF为中性滤光片;LED为发光二极管;PBS为偏振分光棱镜;MO为长焦物镜;M为参考反射镜;S为待测样品.

收稿日期 2011-09-01.

作者简介 卢文龙(1981-),男,讲师;刘晓军(通信作者),教授, E-mail: mexjl@mail. hust. edu. cn.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51075169; 51005089).

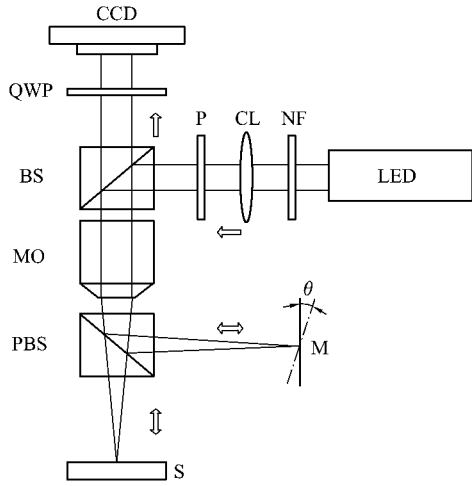


图1 离轴数字全息光路简图

离轴数字全息图的强度值可以表示为

$$\begin{aligned} I(x, y) = & O(x, y)O(x, y)^* + \\ & R(x, y)R(x, y)^* + O(x, y) \cdot \\ & R(x, y)^* + R(x, y)O(x, y)^*, \end{aligned} \quad (1)$$

经计算机模拟再现光波  $C(x, y) = R(x, y)$  照射全息图,数学上等同于它与数字全息图相乘(此处忽略光学全息的化学显影过程,将振幅透过率函数设为单位值),可得恢复光场的复振幅分布:

$$\begin{aligned} I(x, y)C(x, y) = & (|O|^2 + |R|^2)R(x, y) + \\ & O(x, y)|R|^2 + R(x, y)R(x, y)^*O(x, y)^*. \end{aligned} \quad (2)$$

从式(2)可以看出成像的光场分为3部分:等式右边第1项是与再现光波相似的光场,其振幅分布被放大调制并产生了畸变,是一个高亮的干扰光场,被称为0级项;第2项可以完全表示原始的物光波,通常情况下仅被再现光振幅分布中的常数因子调制,被称为+1级项或原始像,对应于传统光学全息中的虚像;第3项是畸变了的共轭物光场,因再现光场的相位分布导致2次畸变,被称为共轭像或者-1级项。

通过傅里叶变换,式(1)的角谱可以表示为

$$A_{S1}(k_x, k_y; 0) = \text{FFT}(I; 0) = \iint I(x_0, y_0; 0) \cdot \exp[-i(k_x x_0 + k_y y_0)] dx_0 dy_0. \quad (3)$$

在频域滤除直透光和共轭像后,可以提取出含再现像的信息

$$\begin{aligned} A_{S2}(k_x, k_y; 0) = & \text{FFT}(OR^*; 0) = \iint A_O A_R \cdot \\ & e^{i(\phi_O - \phi_R)} \exp[-i(k_x x_0 + k_y y_0)] dx_0 dy_0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\phi_O$  为物光被长焦物镜所调制相位分布;  $\phi_R$  为参考光被长焦物镜所调制的相位分布。

$$\phi_O'(x, y) = \phi_O(x, y) + \frac{-\pi}{\lambda D_O}(x^2 + y^2) + C;$$

$$\phi_R'(x, y) =$$

$$2\pi(k'_x x + k'_y y) + \frac{-\pi}{\lambda D_R}(x^2 + y^2) + C.$$

因为离轴角度较小,光路是近似对称配置的,物光和参考光有近似相等的二次相位畸变因子  $D_O \approx D_R$ ,所以式(4)可以改写为

$$\begin{aligned} A_{S2}(k_x, k_y; 0) = & \iint A_O A_R \exp\{i[\phi_O - 2\pi(k'_x x + k'_y y)]\} \cdot \\ & \exp[-i(k_x x_0 + k_y y_0)] dx_0 dy_0. \end{aligned}$$

然后,在重建距离  $z=d$  处的角谱重建平面上,  $A_{S2}(k_x, k_y; d)$  可由  $A_{S2}(k_x, k_y; 0)$  和  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$  计算得出,

$$A_{S2}(k_x, k_y; d) = A_{S2}(k_x, k_y; 0) \exp(ik_z d).$$

在该平面上,重建的复振幅分布

$$U(x, y; d) = A_O A_R \exp\{i[\phi_O - 2\pi(k'_x x + k'_y y)]\} = \text{FFT}^{-1}[A_{S2}(k_x, k_y; d)].$$

最后,物光波的原始振幅与相位信息可写为

$$A_O = |U(x, y; d)| / A_R;$$

$$\phi_O = \arctan \frac{2\text{Im}[U(x, y; d)]}{\text{Re}[U(x, y; d)]} + 2\pi(k'_x x + k'_y y).$$

通过调整平面波的载波频率<sup>[7]</sup>,就能得出  $\phi_O$ ,它与被测体的高度信息相对应,从而被测体的高度信息可以由此得出。

以上为LED照明下平面波记录全息图和再现的原理过程,采用的是角谱算法;激光照明下球面波记录全息图的原理过程与之类似,只是采用激光点源并去掉准直镜即可。

## 2 实验结果与分析

根据离轴数字全息术的原理,按图1搭建了相应的实验平台。被测物体是中国计量科学研究院标定的标准刻线板,编号为 No. A-11-399。在普通的LED中,红色LED可以提供最大的离轴夹角<sup>[8]</sup>,它被用作本实验的光源,其中心波长为632.8 nm,频谱半高宽  $(10 \pm 2)$  nm。实验中采用的是工作距离为33.5 mm的10倍长焦物镜,记录全息图的CMOS幅面为  $1024 \times 768$ ,其像素大小为  $\Delta x = \Delta y = 3.2 \mu\text{m}$ 。

图2显示了LED平面波照明(图1光路)与激光球面波照明的对比结果,图2(a)中干涉条纹强度较均匀,而图2(c)中受激光散斑影响严重。可见图2(d)中受多重反射现象<sup>[9]</sup>影响严重,多个区域出现伪信息,而图2(a)中没有多重反射现象,只有直透光、原始像、共轭像3部分频谱信息。

图3显示的是由LED平面波照明获取的全

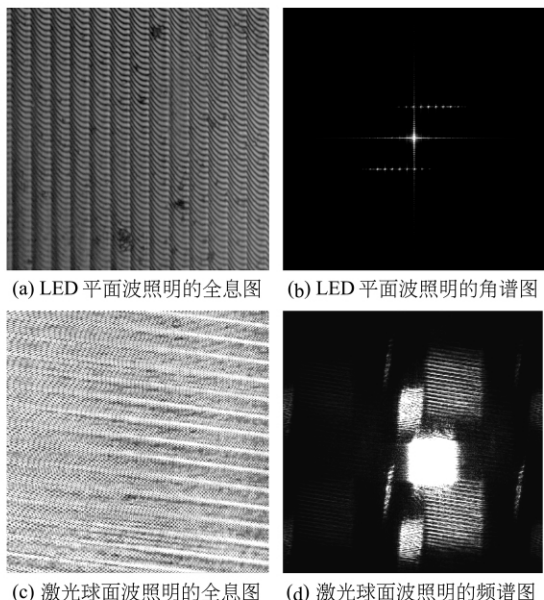


图 2 LED 平面波照明与激光球面波照明的对比  
息图的重建结果. 该全息图重建距离为  $d = \Delta x \times \Delta y \times 1.024 / \lambda = 16.6 \text{ mm}$ , 由于被测物高度小于半  
波长, 因此重建过程中不需要相位解包裹过程. 重  
建的刻线周期为  $40.1 \text{ }\mu\text{m}$  (标准值为  $40.0 \text{ }\mu\text{m}$ ),  
重建表面的粗糙度  $R_a$  值为  $0.089 \text{ }\mu\text{m}$  (标准值为  
 $0.090 \text{ }\mu\text{m}$ ).

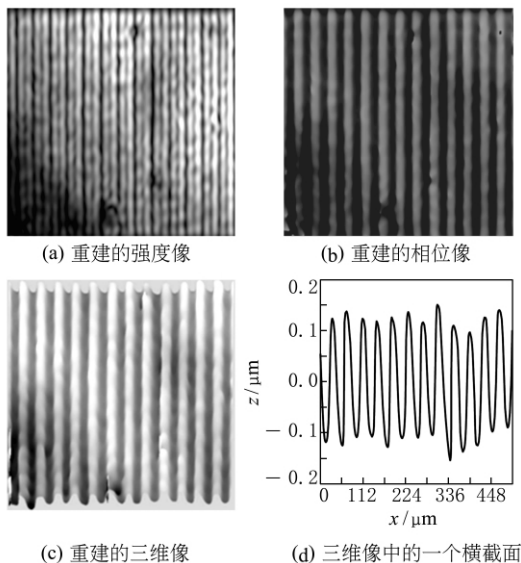


图 3 由 LED 照明下平面波记录的全息图的  
三维重建结果

通常而言,若离轴的夹角过小而物光波的频  
谱带宽较大,则直透光和共轭像将在频谱图中发  
生重叠而难以被滤除. 激光比 LED 能提供更大的  
离轴夹角,在滤波方面往往有更大优势. 然而,当  
平面波记录的全息图由基于平面波理论的角谱算  
法来重建时,相对于激光照明下的菲涅耳算法,其

记录与重建距离不受限制,可在更小的重建距离  
高分辨率重建,并可避免采样不足的现象<sup>[10]</sup>;对  
微纳表面物体的小频谱带宽而言,也不会发生过  
度重叠的现象(如图 2(b)没有重叠,而图 2(d)已  
有重叠),因而会得到更佳的再现结果.

### 参 考 文 献

- [1] 张建军,张圣祖,黄晶晶,等. 一种新的光学全息记录  
材料的制备及性能研究[J]. 华中科技大学学报: 自  
然科学版, 2009, 37(10): 72-75.
- [2] Schnars U, Juptner W. Direct recording of holograms  
by a CCD target and numerical reconstruction[J].  
Applied Optics, 1994, 33: 179-181.
- [3] Ferraro P, Alferi D, Nicola S. Quantitative phase-  
contrast microscopy by a lateral shear approach to  
digital holographic image reconstruction[J]. Applied  
Optics, 2006, 45: 1045-1047.
- [4] Hao Y, Asundi A. Comparison of digital holographic  
microscope and confocal microscope methods for char-  
acterization of micro-optical diffractive components  
[C] // Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE,  
2008: 7155,71550B.
- [5] Shi H, Fu Y, Quan C, et al. Vibration measurement  
of a micro-structure by digital holographic microscopy  
[J]. Measurement Science and Technology, 2009,  
20(6): 06301.
- [6] Shaffer E, Marquet P, Depeursinge C. Real time,  
nanometric 3D-tracking of nanoparticles made possi-  
ble by second harmonic generation digital holographic  
microscopy[J]. Optics Express, 2010, 16: 17393-  
17403.
- [7] Colomb T, Cuche E, Charriere F, et al. Automatic  
procedure for aberration compensation in digital holo-  
graphic microscopy and applications to specimen  
shape compensation[J]. Applied Optics, 2006, 45:  
851-863.
- [8] Sturwald S, Kemper B, Remmersmann C, et al. Ap-  
plication of light emitting diodes in digital holographic  
microscopy[C] // Proceedings of SPIE. Bellingham:  
SPIE, 2008, 6995, 699507.
- [9] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Spatial filtering  
for zero-order and twin image elimination in digital  
off-axis holography[J]. Applied Optics, 2000, 39:  
4070-4075.
- [10] Mann C, Kim M. Quantitative phase-contrast mi-  
croscopy by angular spectrum digital holography  
[C] // Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE,  
2006, 6090, 60900B.