

# 利用综合复用技术拓展数字全息显微系统中的记录视场\*

吴永丽<sup>1)</sup> 杨勇<sup>1)†</sup> 翟宏琛<sup>1)</sup> 马忠洪<sup>1)</sup> 盖琦<sup>2)</sup> 邓丽军<sup>1)</sup>

1) (南开大学现代光学研究所, 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2) (天津理工大学中环信息学院, 天津 300380)

(2012年10月9日收到; 2012年11月16日收到修改稿)

为了解决现有数字全息显微系统中高分辨率与大记录视场无法同时兼得的问题, 提出了一种在不牺牲分辨率的前提下拓展数字全息显微记录视场的方法. 该方法中运用了波长不同、偏振态不同的四路相互不相干的探测物光, 同时探测被测样品四个相邻的不同区域, 并使这四束探测物光分别与其相应的参考光相干, 在记录面上同时记录下含有被测样品不同区域信息的复合全息图. 将获得的复合全息图经过频谱变换和数字滤波, 分别重构出所记录区域的振幅和相位分布. 最后通过图像拼接和图像融合技术, 可实现接近原记录视场四倍的大视场数字全息显微记录. 该方法在测量过程中无需移动记录装置、光源和被测样品, 单次曝光即可实现, 实验结果验证了本文所提方法的可行性.

**关键词:** 数字全息显微术, 角分复用, 偏振复用, 波长复用

**PACS:** 42.40.-i, 42.30.Va, 42.40.Kw, 42.25.Hz      **DOI:** 10.7498/aps.62.084203

## 1 引言

数字全息显微术被广泛应用于诸如生物样品分析<sup>[1,2]</sup>、微结构成像<sup>[3,4]</sup>和三维显微成像等很多领域<sup>[5,6]</sup>. 但在通常的数字全息显微系统中, 高分辨率与大记录视场往往无法同时兼得. 为了提高探测分辨率, 可在实验中采用大数值孔径的放大系统. 但由于记录全息图的电荷耦合元件 (CCD) 的靶面尺寸和像元尺寸 (分辨率) 的限制, 该系统会无法同时实现大视场的记录. 为了解决这个问题, Alexandrov 等<sup>[7]</sup>提出采用综合孔径全息显微技术, 可在提高探测分辨率的同时, 增加探测视场. 但该类方法大多需要采用精确的扫描装置<sup>[8]</sup>, 因而不能用来记录动态被测样品. 文献<sup>[9]</sup>提出了一种在被测样品后放置透镜阵列的方法. 该方法通过减小物光与参考光的夹角来增加干涉的空间频率, 从而

实现大视场的探测. 文献<sup>[10]</sup>将数字微透镜阵列 (DMD) 引入到共轴数字全息显微光路中, 并利用其改变点光源的大小和位置, 实现扫描的探测. 上述拓展记录视场的方法均需要移动 CCD<sup>[8]</sup>、光源<sup>[10]</sup>、样品<sup>[7,11]</sup>或使用特殊的光学器件<sup>[9,10]</sup>, 因而对记录系统的稳定性要求比较高, 而且不能用来记录动态被测样品. 记录同样大小的视场, 在成像效率上与扫描式的方法相比, 本文所提方法所需时间一般在毫秒量级, 而扫描式所需时间取决于机械扫描机构的响应时间, 一般为秒量级. 虽然文献<sup>[12]</sup>给出了一种采用光学非线性材料的方法实现了记录视场的拓展, 但该方法仅拓展了原视场的 30%.

本文提出一种拓展数字全息显微系统记录视场的新方法. 在该方法中, 综合运用了波长复用、偏振复用和角分复用技术, 无需任何形式的扫描, 可同时实现四路被测样品不同区域信息的记录, 并可不在牺牲分辨率的前提下, 将记录视场增大将近

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60838001)、天津市应用基础及前沿技术研究计划 (批准号: 11JCYBJC01400) 和南开大学科技创新基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

四倍.

## 2 原理

采用本文所提出的技术实现大视场记录的原理为: 分别利用互不相干的多束物光同时照射被测样品的相邻的不同区域, 并使被测样品上不同区域的信息以全息图的方式同时被记录在 CCD 的一帧画面上. 这样无需改变系统的原放大率, 即在不降低系统横向探测分辨率的情况下, 实现了大记录视场的全息记录. 由于记录过程无需扫描, 记录一帧所需时间最快可达到 0.01 ms (CCD 的型号为 CMLN-13S2M/C), 因此采用本方法适用于测量一些粒子场的分布 [13] 等一些动态过程.

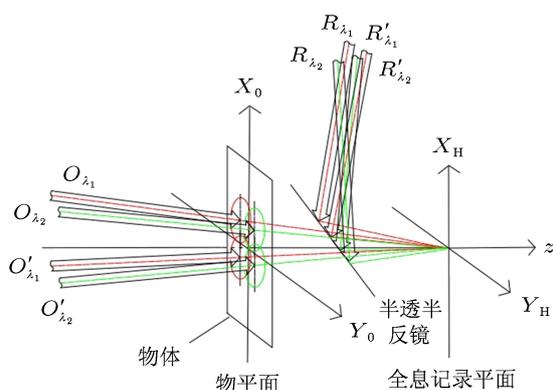


图 1 立体角分复用技术原理示意图

为了在 CCD 一帧画面上实现多幅全息图的同时记录与分离, 本文同时采用了波长复用技术 [14]、偏振复用技术 [15] 和立体角分复用技术 [16], 其原理如图 1 所示. 其中,  $X_0Y_0$  平面为物平面,  $X_HY_H$  平面为记录全息图的 CCD 光敏面. 用波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两束线偏振相干光作为光源, 分别将每个波长的线偏振光分束为偏振态相互垂直的两束光, 从而获得四束相互不相干的线偏光  $O_{\lambda_1}, O'_{\lambda_1}, O_{\lambda_2}, O'_{\lambda_2}$ . 其中,  $O_{\lambda_1}$  和  $O'_{\lambda_1}$  为波长为  $\lambda_1$ , 且偏振态相互垂直的两束物光;  $O_{\lambda_2}$  和  $O'_{\lambda_2}$  为波长同为  $\lambda_2$ , 且偏振态相互垂直的两束物光. 分别将这四束光作为探测物光, 并以一定的角度照射样品的相邻区域, 则其透射光线均可照射在 CCD 的光敏面  $X_HY_H$  平面上. 采用同样的方法, 可以获得四束互不相干的参考光, 分别为  $R_{\lambda_1}, R'_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}, R'_{\lambda_2}$ , 在记录平面上的立体角如表 1 所示. 其中,  $R_{\lambda_1}$  和  $R'_{\lambda_1}$  的波长均为  $\lambda_1$ , 且其偏振态分别与  $O_{\lambda_1}$  和  $O'_{\lambda_1}$  相同;  $R_{\lambda_2}$  和  $R'_{\lambda_2}$  的波长均为  $\lambda_2$ ,

且其偏振态分别与  $O_{\lambda_2}$  和  $O'_{\lambda_2}$  相同. 由上述四组物光与参考光分别干涉形成的全息图会在 CCD 的一帧图像上以非相干的方式叠加, 形成一幅复合全息图. 而且上述复合全息图的四幅子全息图的频谱会因参考光的角度不同在空间上互相分离.

表 1 参考光在记录平面上与坐标轴所成角度

参考光	$X_H$	$Y_H$	$Z$
$R_{\lambda_1}$	88.9°	87.9°	2.9°
$R'_{\lambda_1}$	88°	88.3°	3.8°
$R_{\lambda_2}$	89.2°	87.9°	3.1°
$R'_{\lambda_2}$	86.6°	88.6°	5.2°

设  $R_{\lambda_1}, R'_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}, R'_{\lambda_2}$  与  $X_H$  轴的夹角分别为  $\alpha_1, \alpha'_1, \alpha_2, \alpha'_2$ ; 与  $Y_H$  轴的夹角分别为  $\beta_1, \beta'_1, \beta_2, \beta'_2$ ; 物光  $O_{\lambda_1}, O'_{\lambda_1}, O_{\lambda_2}, O'_{\lambda_2}$  通过被测样品后的复振幅分别用  $D_{\lambda_1}, D'_{\lambda_1}, D_{\lambda_2}, D'_{\lambda_2}$  表示. 则包含四张子全息图的复合全息图的光强为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) = & |D_{\lambda_1}|^2 + |D'_{\lambda_1}|^2 + |D_{\lambda_2}|^2 + |D'_{\lambda_2}|^2 \\
 & + |R_{\lambda_1}|^2 + |R'_{\lambda_1}|^2 + |R_{\lambda_2}|^2 + |R'_{\lambda_2}|^2 \\
 & + D_{\lambda_1}R_{\lambda_1}^* + D'_{\lambda_1}R_{\lambda_1} + D'_{\lambda_1}R_{\lambda_1}^* \\
 & + D'_{\lambda_1}R'_{\lambda_1} + D_{\lambda_2}R_{\lambda_2}^* \\
 & + D_{\lambda_2}^*R_{\lambda_2} + D'_{\lambda_2}R_{\lambda_2}^* + D'_{\lambda_2}R'_{\lambda_2}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

对上式做傅里叶变换可得

$$\begin{aligned}
 U(f_x, f_y) = & F[I(x, y)] \\
 = & U_0(f_x, f_y) + U_{\lambda_1}(f_x + f_{\alpha_1}, f_y + f_{\beta_1}) \\
 & + U_{\lambda_1}(f_x - f_{\alpha_1}, f_y - f_{\beta_1}) \\
 & + U'_{\lambda_1}(f_x + f_{\alpha'_1}, f_y + f_{\beta'_1}) \\
 & + U'_{\lambda_1}(f_x - f_{\alpha'_1}, f_y - f_{\beta'_1}) \\
 & + U_{\lambda_2}(f_x + f_{\alpha_2}, f_y + f_{\beta_2}) \\
 & + U_{\lambda_2}(f_x - f_{\alpha_2}, f_y - f_{\beta_2}) \\
 & + U'_{\lambda_2}(f_x + f_{\alpha'_2}, f_y + f_{\beta'_2}) \\
 & + U'_{\lambda_2}(f_x - f_{\alpha'_2}, f_y - f_{\beta'_2}), \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中  $U(f_x, f_y)$  为  $I(x, y)$  的傅里叶变换;  $f_x$  和  $f_y$  分别为  $x, y$  方向的空间频率;  $U_0(f_x, f_y)$  为零级项;  $U_{\lambda_1}(f_x + f_{\alpha_1}, f_y + f_{\beta_1})$  和  $U_{\lambda_1}(f_x - f_{\alpha_1}, f_y - f_{\beta_1})$  分别为波长  $\lambda_1$  的物光与参考光所形成的全息图的正负一级频谱;  $U'_{\lambda_1}(f_x + f_{\alpha'_1}, f_y + f_{\beta'_1})$  和  $U'_{\lambda_1}(f_x - f_{\alpha'_1}, f_y - f_{\beta'_1})$  分别是波长仍为  $\lambda_1$  但偏振态旋转 90° 的物光与参考光所形成的全息

图的正负一级频谱. 同理,  $U_{\lambda_2}(f_x + f_{\alpha_2}, f_y + f_{\beta_2})$  和  $U_{\lambda_2}(f_x - f_{\alpha_2}, f_y - f_{\beta_2})$  分别是波长为  $\lambda_2$  的物光与参考光所形成的全息图的正负一级频谱;  $U'_{\lambda_2}(f_x + f_{\alpha'_2}, f_y + f_{\beta'_2})$  和  $U'_{\lambda_2}(f_x - f_{\alpha'_2}, f_y - f_{\beta'_2})$  分别为波长仍为  $\lambda_2$ , 但其偏振态为旋转  $90^\circ$  后的物光与参考光所形成的全息图的正负一级频谱.

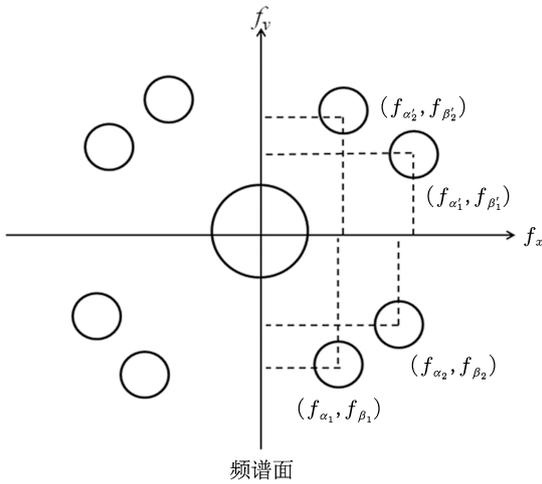


图2 复合全息图频谱分布示意图

由 (2) 式的结果可以看出, 因四张子全息图的物光与参考光夹角不同, 使每幅子全息图的正负一级频谱在频谱空间中的位置不同, 如图 2 所示. 通过选择不同的滤波窗口, 可将上述四幅全息图的一级频谱分离, 并可经相应的再现衍射光场的数字计算, 重构被测样品不同区域的振幅和相位分布图像. 最后, 通过图像拼接和图像融合技术, 可实现接近原记录视场四倍的大视场数字全息显微记录与再现.

### 3 实验系统

根据本文所提出的大视场记录原理, 搭建的实验系统示意图如图 3 所示. 其中采用输出的波长分别为  $\lambda_1$  (632.8 nm) 和  $\lambda_2$  (532 nm) 的两台激光器分别经过扩束准直后由  $BS_1$  耦合到同一光路中, 并经偏振分光棱镜  $PBS$  后, 使每个波长的光分别分束为两路光偏振态互相垂直的线偏振光. 此后, 其分别经  $BS_2$  和  $BS_3$  后被分为  $R_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}, O_{\lambda_1}, O_{\lambda_2}$  和  $R'_{\lambda_1}, R'_{\lambda_2}, O'_{\lambda_1}, O'_{\lambda_2}$  的八路光. 其中, 字母“O”代表物光, 字母“R”代表参考光, 下标“ $\lambda_1$ ”和“ $\lambda_2$ ”分别代表不同的波长; 上标“'”代表了偏振态旋转了  $90^\circ$ . 所以可以分别获得四路物光  $O_{\lambda_1}, O'_{\lambda_1}, O_{\lambda_2}, O'_{\lambda_2}$  和相应的四路参考光  $R_{\lambda_1}, R'_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}, R'_{\lambda_2}$ , 且四路物光之间及四路参考光之间均互不相干. 四路物光分别经  $BS_5, M_3$  和  $BS_6, M_4$  后, 照射在被测样品的四个相邻区域, 如图 3 中的物体上方图像所示, 采用滤光片  $Fr$  和  $Fg$  可选择出所需要的波长的物光. 从样品投射的物光与参考光经  $BS_7$  后在  $CCD$  感光面上分别干涉, 从而在  $CCD$  的同一帧图像上形成四幅相互重叠的子全息图.

根据采样定理, 参考光与物光的角度  $\theta$  需满足公式  $\sin \theta < \lambda/2p$  [17], 其中  $p$  为  $CCD$  的光敏单元尺寸, 针对不同入射波长的光, 将  $p = 3.75 \mu\text{m}$  和  $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}, \lambda_2 = 532 \text{ nm}$  分别代入上式得

$$\begin{aligned} \theta_1 &< 0.084 \text{ rad (约为} 4.8^\circ), \\ \theta_2 &< 0.071 \text{ rad (约为} 4.1^\circ). \end{aligned} \quad (3)$$

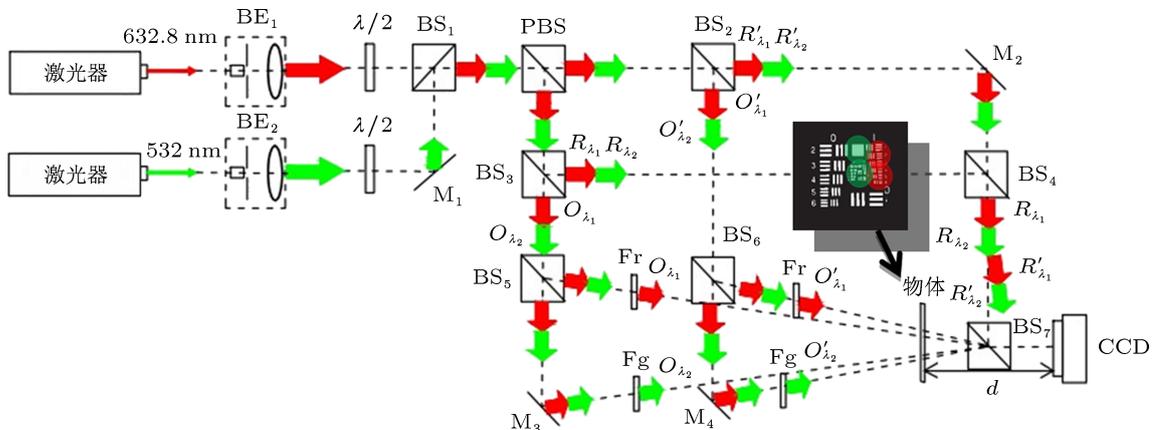


图3 实验系统图 BE, 扩束器; BS, 分光棱镜;  $\lambda/2$ , 半波片; PBS, 偏振分光棱镜; M, 反射镜; Fr, 红光滤光片; Fg, 绿光滤光片

因此,在光路设计中物光和参考光的夹角需满足(1)式条件.而且为保证再现样品的连续性,需调节物光入射角度和再现距离 $d$ ,使物光通过样品的相邻区域且在 CCD 靶面上与参考光干涉.实验中所拍摄的物体为 Newport 公司的 NSAF-1951 分辨率板.其拍摄区域如图 3 所示.接收装置为像元尺寸为  $3.75\ \mu\text{m}$  的  $1280(\text{H}) \times 960(\text{V})$  的 CMLN-13S2M/C 型号 CCD,与样品的距离  $d$  为  $60\ \text{mm}$ .

#### 4 实验结果与分析

采用图 3 的实验系统记录的复合全息图如图 4(a) 所示,其傅里叶变换后的频谱分布如图 4(b) 所示.为了保证红光与绿光的频谱互相分离,可以调整图 3 中的  $M_1$  使四束参考光以不同的角度入射到 CCD 靶面.图 4(b) 中频谱的标注与图 3 光路中的相对应.其频谱  $F_{\lambda_1}, F'_{\lambda_1}, F_{\lambda_2}, F'_{\lambda_2}$  分别对应物光  $O_{\lambda_1}, O'_{\lambda_1}, O_{\lambda_2}, O'_{\lambda_2}$ .应用数字滤波的方法分别滤出四路

光的频谱,然后对频谱做傅里叶变换和菲涅尔衍射光场的计算,可得到四幅子全息图的再现像如图 5 所示.

图 5(a)—(d) 分别为  $F_{\lambda_1}, F'_{\lambda_1}, F_{\lambda_2}, F'_{\lambda_2}$  的再现像;(e) 为拼接之后的图像.其中,从图 5(d) 可看出此系统可分辨 USAF 分辨率版的第 5 组第 5 单元,分辨率为  $50\ \text{lp/mm}$  ( $20\ \mu\text{m}$ ).图 6 为在相同的实验条件下的单路离轴记录的全息图、单路频谱图和再现像.其中物光为正入射,参考光与  $X_H$  和  $Y_H$  夹角分别为  $87^\circ$  和  $93^\circ$ .由图 6(c) 可知单路的分辨率可达到  $50\ \text{lp/mm}$  ( $20\ \mu\text{m}$ ),与拓展后的分辨率一致.可见本文提出的拓展视场的方法不会牺牲原光路系统的分辨率.分别将四幅子全息图的再现像按顺序拼接之后可得到大视场的重构图像如图 5(e) 所示.考虑到再现像之间的重叠,通过本文提出的拓展视场的方法进行记录和再现之后,可以将记录视场拓展将近四倍,相当于将 CCD 的像素点数增加了将近四倍.

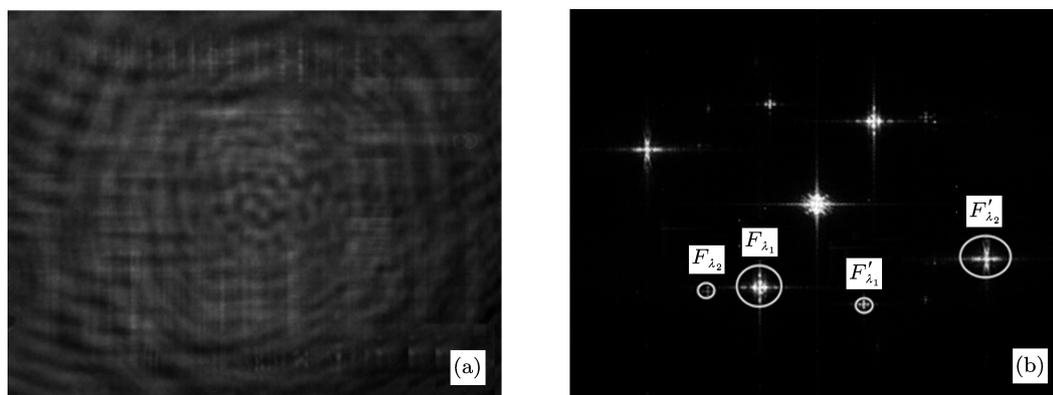


图 4 四路复合全息图及傅里叶频谱分布 (a) 全息图; (b) 频谱图

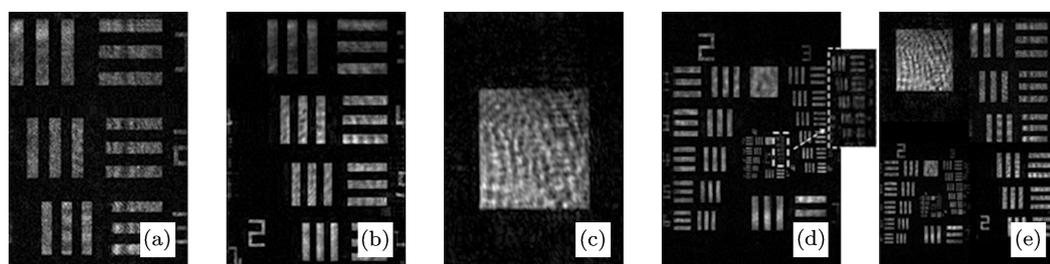


图 5 四幅子全息图的再现像及最后拼接图像 (a)—(d) 分别为  $F_{\lambda_1}, F'_{\lambda_1}, F_{\lambda_2}, F'_{\lambda_2}$  的再现像; (e) 拼接之后的图像

#### 5 结论

在数字全息显微系统中,大记录视场和高分辨

率一直是人们追求的永恒目标.本文提出了一种综合复用技术的记录视场的方法,可在不牺牲分辨率的前提下拓展数字全息显微记录视场的方法.该方

法无需移动 CCD、样品和光源, 单次曝光即可实现, 且实验装置简单, 没有复杂的数据处理过程, 可用于动态样品的实时记录. 由于没有限制拍摄样品,

所以该方法也可用于记录复杂的相位物体. 实验表明, 该方法可以在保证原系统分辨率不降低的前提下, 将记录视场拓展接近四倍.

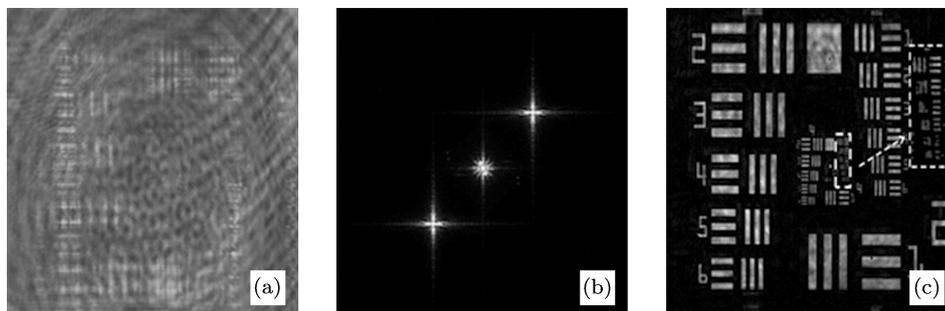


图 6 单路离轴的全息图、频谱和再现现象 (a) 全息图; (b) 单路频谱图; (c) 单路再现图像

- [1] Pierre M, Benjamin R, Pierre J M, Etienne C, Yves E, Tristan C, Christian D 2005 *Opt. Lett.* **30** 468
- [2] Björn K, Daniel C, Alexander H, Gert V B, Ilona B, Jürgen S 2006 *Proc. SPIE* 6191
- [3] Wu X H, Gérard G, Siegfried M G C, Chen L G, Cen K F 2009 *Opt. Lett.* **34** 857
- [4] Xu L, Peng X Y, Miao J M, Asundi A K 2001 *Appl. Opt.* **40** 5046
- [5] Tong Z, Ichirou Y 1998 *Opt. Lett.* **23** 1221
- [6] Adrian S, Bahram J 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 163
- [7] Alexandrov S A, Hillman T R, Gutzler T, Sampson D D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 168102
- [8] Di J L, Zhao J L, Jiang H Z, Zhang P, Fan Q, Sun W W 2008 *Appl. Opt.* **47** 5654
- [9] Shin S, Park M, Han L K, Son J 2005 *Proc. SPIE* **6016** 307
- [10] Adeyemi I A A, Darcie T E 2009 *Appl. Opt.* **48** 3291
- [11] Alexandrov S A, Hillman T R, Gutzler T, Sampson D D 2007 *Opt. Photon. News* **18** 29
- [12] Barsi C, Fleischer J 2010 *Nonlinear Photonics* Karlsruhe, Germany, June 21, 2010 p49
- [13] Lü Q N, Ge B Z, Gao Y, Zhang Y M 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 1004 (in Chinese) [吕且妮, 葛宝臻, 高岩, 张以谟 2010 光子学报 **39** 1004]
- [14] Wang X L, Zhai H C 2007 *Opt. Commun.* **275** 42
- [15] Yuan C J, Situ G H, Pedrini G C, Ma J, Osten W 2011 *Appl. Opt.* **50** B6
- [16] Wang X L, Zhai H C, Mu G G 2006 *Opt. Lett.* **31** 1636
- [17] Wang X L, Zhai H C, Wang Y, Mu G G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1137 (in Chinese) [王晓雷, 翟宏琛, 王毅, 母国光 2006 物理学报 **55** 1137]

# Colligated multiplexing approach to expanding the field of view in the recording process of digital holographic microscopy\*

Wu Yong-Li<sup>1)</sup> Yang Yong<sup>1)†</sup> Zhai Hong-Chen<sup>1)</sup> Ma Zhong-Hong<sup>1)</sup>  
Gai Qi<sup>2)</sup> Deng Li-Jun<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Optical Information Science and Technology of the Education Ministry of China, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

2) (College of Zhonghuan Information, Tianjin University of Technology, Tianjin 300071, China)

(Received 9 October 2012; revised manuscript received 16 November 2012)

## Abstract

We present a method to expand the record field of view in the recording process of digital holographic microscopy systems without loss of resolution. A series of incoherent sub-holograms covering different regions of sample can be recorded in a single frame of the CCD synchronously based on wavelength and polarization multiplexing. The reconstructed images can be obtained with information about different parts of the sample. Thus, the synthetic reconstructed image with a wider field can be achieved by image stitching and fusion technology without any form of scanning. Based on single-exposure working principle, this approach can be used for real-time recording of the dynamic samples without moving CCD, point source and tested samples. Experimental results show that the final synthetic image produced by the system in this paper can be achieved to be close to four times as large as the original record field of view with original resolution.

**Keywords:** digital holography, angular multiplexing, polarization multiplexing, wavelength multiplexing

**PACS:** 42.40.-i, 42.30.Va, 42.40.Kw, 42.25.Hz

**DOI:** 10.7498/aps.62.084203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60838001), the Application of Basic and Frontier Technology Research Program of Tianjin, China (Grant No. 11JCYBJC01400), and the Science and Technology Innovation Fundation of Nankai University, China.

† Corresponding author. E-mail: yangyong@nankai.edu.cn