

doi:10.3788/gzxb20144310.1011001

基于光程差扫描的低相干离轴数字全息术

邓丽军¹, 杨勇¹, 石炳川¹, 马忠洪¹, 盖琦², 翟宏琛¹

(1 南开大学 现代光学研究所 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

(2 天津理工大学 中环信息学院, 天津 300380)

摘 要:针对在低相干离轴数字全息术中,光源相干长度限制物光波可探测面积的问题,提出了一种基于光程差扫描的低相干离轴数字全息记录方法.首先,通过改变参考光和物光波之间的光程差,使得干涉条纹扫描记录平面的不同区域,而后对各个区域的数字全息图采用数值再现的方法获取不同区域处的物光波相位分布,最后采用相位拼接技术拼接各个区域的相位分布实现物光波的全视场探测.

关键词:低相干离轴数字全息;光程差扫描;物光波的全视场

中图分类号:O438.1;TN911.73

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)10-1011001-5

Low Coherence Off-axis Digital Holography Based on Scanning the Optical Path Difference

DENG Li-jun¹, YANG Yong¹, SHI Bing-chuan¹, MA Zhong-hong¹, GE Qi², ZHAI Hong-chen¹

(1 *Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Education Ministry of China, Tianjin 300071, China*)

(2 *Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China*)

Abstract: A recording method based on scanning the optical path difference was proposed in low coherence off-axis digital holography, due to the coherence length of the light source limit the detected area of the object wave. First, the different areas of detected plane were scanned by changing the optical path difference between the reference wave and the object wave. Then, the phase distribution of each scanning area was obtained by numerical reconstruction for each scanning area of digital hologram. At last, phase stitching technology was applied to stitch each scanning area to achieve the full field of the view of the object wave.

Key words: Low coherence off-axis digital holography; Scanning the optical path difference; Full field of the view of the object wave

OCIS Codes: 090.1995; 110.6880; 110.0180; 100.3010; 100.508

0 引言

在离轴数字全息术中,使用低相干光源可以获得使用普通相干长度的单色光源(如氦氖激光)无法获得的信息.例如,将基于飞秒脉冲激光泵浦探测的离轴数字全息术应用于光与物质相互作用的超快过程,可以获得高时间分辨的探测信息^[1-3],或在离轴数字全息中采用超连续谱光源^[4]、发光二极管光源^[5-6]和白光光

源^[7]等宽带光源能有效减少记录系统中的散斑噪声,从而提高离轴数字全息术的成像和重建质量.

但是在低相干光源离轴数字全息术中,光源的相干长度越短,物光和参考光相干的区域也就会越小,从而限制了可探测的物光波面积.利用立体角分复用技术^[8]和角色散元件^[9-13]可以拓展干涉区域和探测面积.

立体角分复用技术通过利用不同立体角度的多个参考光与不同区域的物光波进行干涉,从而实现物光

基金项目:国家自然科学基金科学仪器基础研究项目(No. 61227010)资助

第一作者:邓丽军(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为数字全息术的研究. Email: jxldeng2008@163.com

导 师:翟宏琛(1944—),男,博士,教授,主要研究方向为数字全息、飞秒级超快瞬态过程探测等方面的研究. Email: zhai@nankai.edu.cn

通讯作者:杨勇(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为光学信息处理、数字全息干涉测量、三维成像与显示技术. E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

收稿日期:2013-12-13; **录用日期:**2014-02-28

<http://www.photon.ac.cn>

波的全视场探测. 但是其记录光路过于复杂, 系统稳定性很难保证.

角色散元件如光栅^[9-10], 棱镜^[11] 或微光学元件^[12-13] 对入射光波波前进行倾斜, 达到扩展干涉区域及物光波可探测面积的目的. 但是角色散器件的色散效率及衍射效率不仅会直接影响扩展干涉区域的效果, 而且会使得测量基准的变化.

本文提出一种在低相干离轴数字全息中, 通过改变参考光和物光波的光程差, 实现物光波的全视场探测.

1 理论分析

为简化讨论, 只讨论 x 轴方向的全息图分布, 物光波和参考光波为平面光波. 如图 1 所示, 物光波正入射到光电耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 的记录靶面, 参考光和物光波成 θ 夹角斜入射到 CCD 靶面形成离轴全息图. 在低相干光源的离轴数字全息术中, CCD 靶面上只有部分区域存在干涉条纹, 其数字全息图可以表示为

$$I = \text{rect}\left(\frac{x-a_1}{l}\right) \{ |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R \} \quad (1)$$

式中, a_1, l 为数字全息图在 CCD 靶面上的中心坐标及平均宽度, O 为物光波的复振幅, R 为参考光波的复振幅.

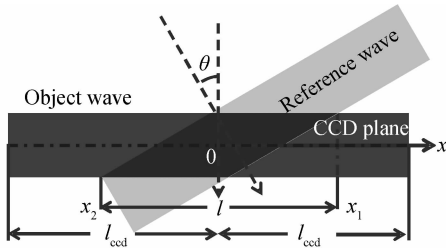


图 1 采用低相干光源的离轴数字全息干涉区域示意图
Fig. 1 Schematic diagram of interference region based on low coherence off-axis digital holography

假设参考光和物光波的零光程差位置位于 x 轴坐标原点处, 数字全息图在 CCD 靶面上的坐标及平均宽度可以表示为

$$\begin{cases} x_1 = N_1 \Delta l = \frac{L_c}{\lambda_o} \frac{\lambda_o}{\sin \theta} = \frac{L_c}{\sin \theta} \\ x_2 = N_2 \Delta l = -\frac{L_c}{\lambda_o} \frac{\lambda_o}{\sin \theta} = -\frac{L_c}{\sin \theta} \\ l = x_1 - x_2 = \frac{2L_c}{\sin \theta} \end{cases} \quad (2)$$

式中, N 为参考光与物光波干涉形成的干涉条纹数目, L_c 为低相干光源的相干长度, Δl 为干涉条纹的条纹间距, λ_o 为低相干光源的中心波长, l 为干涉条纹的平均宽度.

当参考光和物光波之间存在附加光程差且为 ΔL 时, 数字全息图在 CCD 靶面上的坐标变为

$$\begin{aligned} x'_1 &= N'_1 \Delta l = \frac{L_c - \Delta L}{\lambda_o} \frac{\lambda_o}{\sin \theta} = \frac{L_c - \Delta L}{\sin \theta} \\ x'_2 &= N'_2 \Delta l = -\frac{L_c + \Delta L}{\lambda_o} \frac{\lambda_o}{\sin \theta} = -\frac{L_c + \Delta L}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以获得由于附加光程差使得干涉条纹移动的距离为

$$\Delta x = x'_1 - x_1 = \frac{\Delta L}{\sin \theta} \quad (4)$$

为使得 CCD 靶面上始终存在干涉条纹, 式(2)及式(3)必须满足

$$|x_1, x_2, x'_1, x'_2| \leq l_{\text{ccd}} \quad (5)$$

式中, l_{ccd} 为 CCD 的横向半宽度.

分析可知, 通过改变参考光和物光波之间的光程差 ΔL 可以改变数字全息图在 CCD 靶面上的区域, 从而使得干涉条纹扫描存在物光波的区域, 实现对物光波的全视场探测.

当将物光波存在区域全部扫描后, 获得的一系列数字全息图可以表示为

$$I_n = \sum_{n=1}^n \text{rect}\left(\frac{x-a_n}{l}\right) \{ |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R \} \quad (6)$$

式中, n 为扫描次数.

对得到的数字全息图进行数值再现, 获取各个扫描区域的正一级再现像 $\sum_{n=1}^n \text{rect}\left(\frac{x-a_n}{l}\right) OR^*$. 通过模拟产生数字参考光波 R_s , 并与 $\sum_{n=1}^n \text{rect}\left(\frac{x-a_n}{l}\right) OR^*$ 相乘, 得到各个扫描区域的物光波的复振幅分布为

$$O_n = \sum_{n=1}^n \text{rect}\left(\frac{x-a_n}{l}\right) R_s OR^* \quad (7)$$

在反射式像面数字全息中, 式(7)表示的物光波即是原始物光波的复振幅分布, 无需再进行衍射传播计算^[14]. 由式(7)得到相应的包裹相位为

$$\varphi_n = \arctan \left[\frac{\text{Im } O_n}{\text{Re } O_n} \right] \quad (8)$$

式中, Im 表示取复振幅的虚部, Re 表示取实部.

值得注意的是, 要得到各个扫描区域的相位分布 φ_n 还需对式(8)进行相位解包裹, 同时消除数字参考光波对再现物光波的影响. 本文采用最小二乘相位解包裹算法及相位掩模法获取正确的各个扫描区域的相位分布 φ_n ^[15].

在正确获取各个扫描区域的物光波相位分布后, 对其进行拼接, 获取全视场的物光波相位分布. 为方便拼接, 实验中使得各个扫描区域存在重叠区域. 在获取到各个扫描区域的物光波相位分布后, 采用数字融合技术, 获取全视场的物光波相位分布 Φ ^[16].

在反射式数字全息中, 如图 2 所示, 当单位振幅的平面光波垂直入射至被测样品表面, 再反射到平面 Q 时, 光波所走的光程为

$$d = 2H \quad (9)$$

产生的相位分布为

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2H = \frac{4\pi H}{\lambda_0} \quad (10)$$

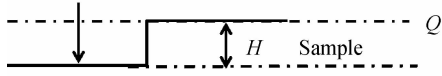


图2 反射型面形结构与光程的关系

Fig. 2 The relationship between the reflection surface profile and optical path

当获取到被测样品的相位分布 Φ , 就可以获取绝对面形分布 $H = \lambda_0 \Phi / 4\pi$.

综上所述, 通过改变光程差 ΔL 来扫描 CCD 靶面的不同区域, 可实现物光波的全视场探测.

2 实验

实验装置见图 3, 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 发出的光经过准直后, 利用透镜 L_3 将其聚焦至显微物镜 (Microscope Objective, MO) 的后焦点处; 聚焦光束通过 MO 后以平面光波形式入射至被测样品及反射镜 M_1 表面, 反射后, 由放置在被测样品像面位置上的 CCD 所记录. 实验中, 利用显微物镜作为成像元件, 使原始物光波产生二次相位弯曲, 假若此时参考光波还采用平面参考光波, 则会造成干涉条纹在全视场的不同区域出现. 为此, 通过在物光路及参考光路使用同规格显微物镜并严格调整参考光路的显微物镜 MO_1 的位置, 使物光波、参考光波的曲率相同, 从而使干涉条纹在全视场中均匀出现, 即采用合理的光路设置直接补偿二次相位误差^[17]. 参考光波与物光波以夹角为 0.84° 在 CCD 的感光面干涉形成像面全息图. 与其他记录光路相比, 像面数字全息记录系统能够充分利用 CCD 的空间带宽积, 提高数字全息再现像的分辨率^[15]. 在实验中, 被测样品为标准 UASAF-1951 分辨率板; 反射镜 M_1 搭载在 NEWPORT 公司生产的型

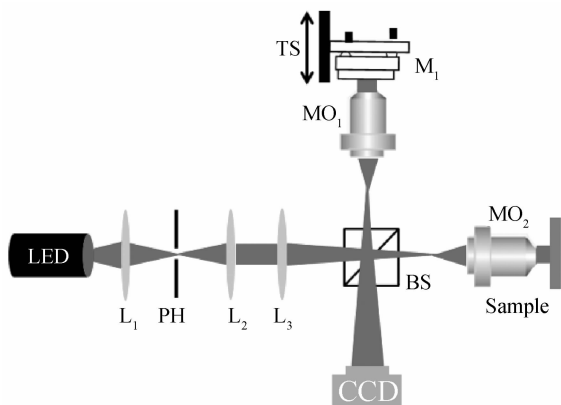


图3 实验光路图

Fig. 3 Experimental setup. L_1, L_2, L_3 lens; PH, pinhole; M_1 , mirror; TS, translation stage

号为 CMA-25CCCL 的高精密线性电动平移台上; 电动平移台的移动精度为 $0.1 \mu\text{m}$, 其控制器为 NEWPORT-ESP301; CCD 的型号为 MINTON-MTV-1881EX, 其像素尺度为 $8.3 \times 8.3 \mu\text{m}^2$, 总像素数为 $768 (H) \times 576 (V)$.

采用的低相干光源是美国 Bridge lux 公司生产的功率为 3 W 的红光 LED, 经 Ocean Optics 公司的 USB4000 光纤光谱仪测得其归一化光谱分布, 如图 4.

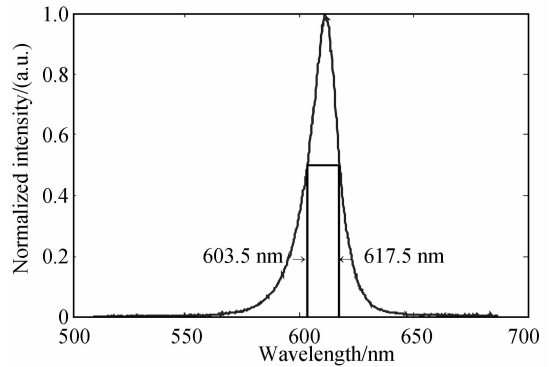


图4 归一化的 LED 光谱分布

Fig. 4 Normalized spectrum of the light intensity emitted by the LED

从图 4 可以看出, 低相干光源 LED 的中心波长 $\lambda = 610 \text{ nm}$, 半峰值谱线宽度 $\Delta\lambda = 14 \text{ nm}$, 相干长度 $L_c = \lambda^2 / \Delta\lambda = 26.57 \mu\text{m}$.

通过控制电动平移台的移动来改变参考光和物光波的光程差, 使参考光和物光波在 CCD 靶面出现干涉条纹, 如图 5(a). 从图中可以看出, 采用合理的光路设置, 消除了二次相位对干涉条纹的弯曲效应, 使干涉条纹在全视场中均匀出现. 同时, 由于低相干光源的相干长度短, 使相干区域只在 CCD 靶面的部分区域出现, 干涉条纹的平均宽度为 2.5 mm 左右.

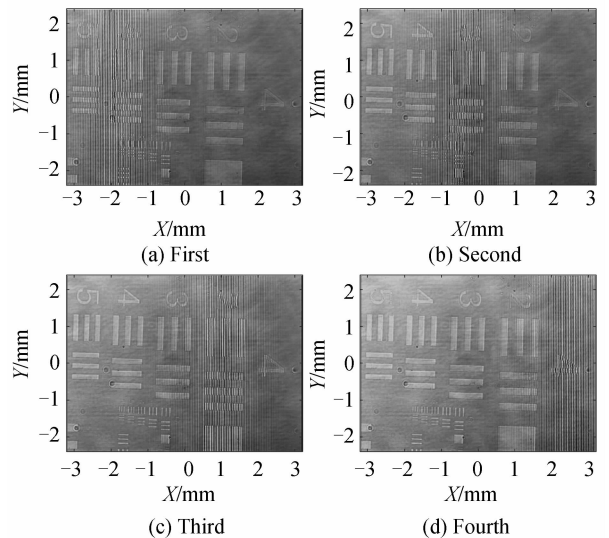


图5 各个扫描区域的数字全息图

Fig. 5 Digital holograms of each scanning area

实验中,为了减少扫描及相位拼接的次数且使各个扫描区域有所重叠,需要干涉条纹存在区域以 $\Delta x = 1.5$ 的间隔扫描 CCD 靶面. 由式(4)可知,应使参考光和物光波之间的光程差为 $\Delta L = \Delta x \sin \theta = 22 \mu\text{m}$, 电动平移台的移动距离为 $11 \mu\text{m}$. 实验获取到各个扫描区域的像面数字全息图图 5.

采用频谱滤波及最小二乘相位解包裹算法并结合系统放大倍率为 6.7 倍, 可以获取各个扫描区域的全息图的相位分布, 如图 6^[16].

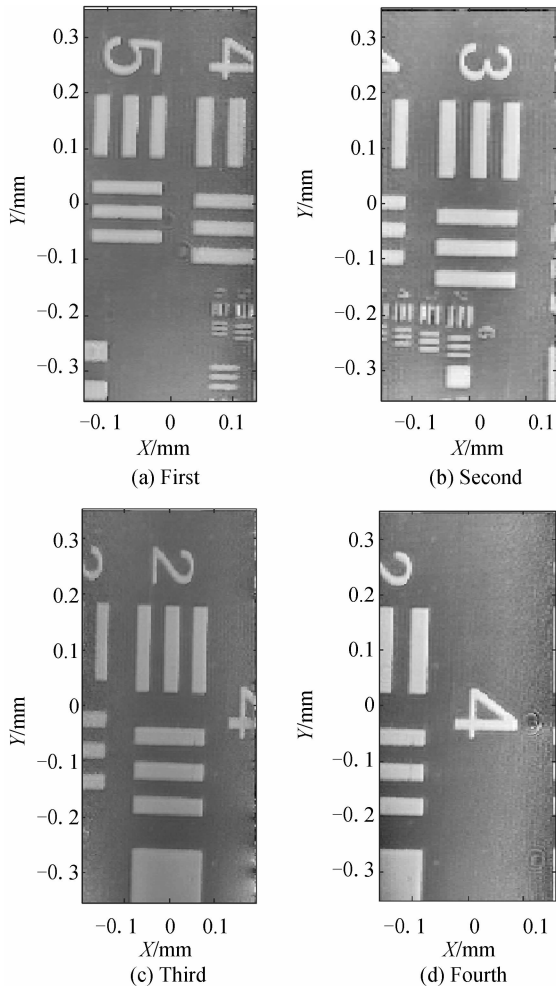


图 6 各个扫描区域的相位分布

Fig. 6 Phase distribution of each scanning area

对各个扫描区域的相位分布采用图像融合技术进行拼接^[16], 获取到被测样品的全视场相位分布如图 7(a). 依据式(10)获取被测样品的形貌分布如图 7(b). 从图中可以看出, 通过采用本文所提方法, 实现了在低相干离轴数字全息中扩大物光波探测面积的目标.

为了分析拼接精度对测量结果的影响, 利用 Veeco NT9100 轮廓仪对图 7(a) 中虚线部分进行了对比检测. 两者对比结果如图 8 所示, 可以看出, 最终的拼接结果实现了扩大物光波探测面积的目标并且能够满足测量精度的要求. 拼接引起的误差大致在 nm 量级^[16].

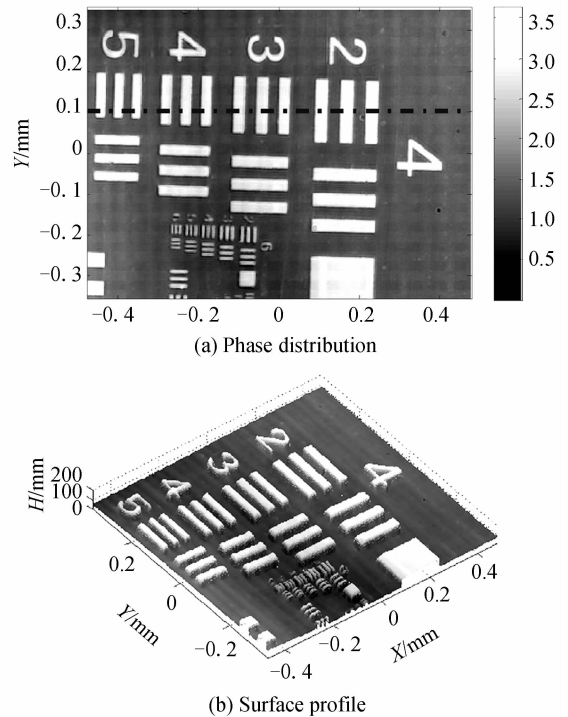


图 7 拼接后 USAF-1951 的相位分布及形貌分布

Fig. 7 Phase distribution of the USAF-1951 after the stitching is completed (a) and (b) its surface profile

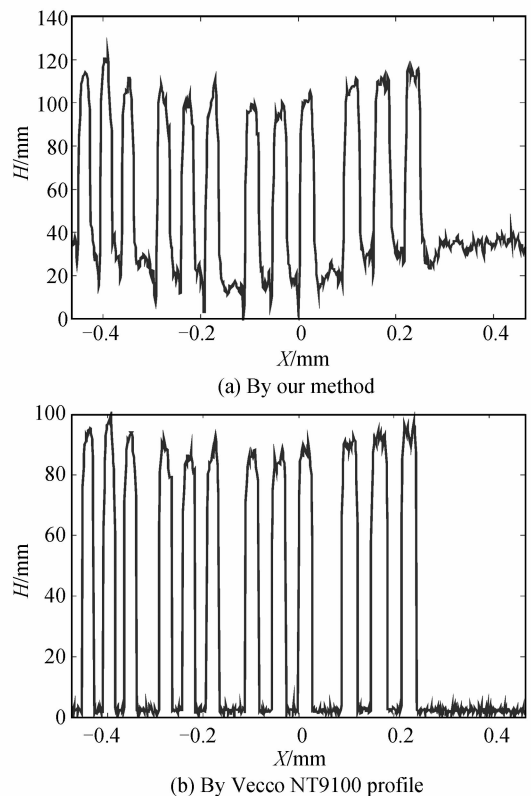


图 8 实验结果对比

Fig. 8 Comparison of the experimental results

3 结论

提出了一种基于光程差扫描的扩大物光波探测面

积的低相干离轴数字全息术.该方法能够有效地解决光源相干长度过短限制物光波探测面积的问题.以标准 USAF-1951 分辨率板作为被测样品,采用本文方法实现了对分辨率板的全视场探测.

参考文献

- [1] HU Hao-feng, WANG Xiao-lei, ZHAI Hong-chen, *et al.* Neutrals ejection in intense femtosecond laser ablation[J]. *Optics Letter*, 2011, **36**(2): 124-126.
- [2] HAYASAKI Y, ISAKA M, TAKITA A, *et al.* Time-resolved interferometry of femtosecond-laser-induced processes under tight focusing and close-to-optical breakdown inside borosilicate glass[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(7): 5725-5734.
- [3] LI Xiao-xi, JIA Tian-qing, FENG Dong-hai, *et al.* The ablation mechanism and ultra-fast dynamics property of lithium fluoride with the ultra-short pulse laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1526-1530.
李晓溪,贾天卿,冯东海等.超短脉冲照射下氟化锂的烧蚀机理及其超快动力学研究[J].光学学报,2005,**25**(11):1526-1530.
- [4] MAO You-xin, GUO Jiang-ping, LIANG Yan-ping, *et al.* Analysis of noise characteristics in an optical coherence tomographic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 324-330.
毛幼馨,郭建平,梁艳梅等.低相干光断层扫描系统的噪声分析与研究[J].光学学报,2005,**25**(3):324-330.
- [5] KEMPER B, STUERWALD S, REMMERSMANN C, *et al.* Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**(7): 499-507.
- [6] QIN Yi, ZHONG Jin-gang. Theoretical and experimental research of digital holography with partially coherent light based on light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2236-2241.
秦怡,钟金钢.基于发光二极管的弱相干光数字全息理论与实验研究[J].光学学报,2010,**30**(8):2236-2241.
- [7] MARTINEZ Leon L, PEDRINI G, OSTEN W. Applications of short-coherence digital holography in microscopy [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(19): 3977-3984.
- [8] MA Zhong-hong, YANG Yong, WU Yong-li. Spatial angular multiplexing for enlarging detection area of off-axis digital holography with low-coherence-length light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 0509001-0509006.
马忠洪,杨勇,吴永丽.采用角分复用技术拓展低相干光源离轴全息术的探测面积[J].光学学报,2013,**33**(5):0509001-0509006.
- [9] MAZNEV A A, CRIMMINS T F, NELSON K A. How to make femtosecond pulses overlap[J]. *Optics Letter*, 1998, **23**(17): 1378-1380.
- [10] BALCUNAS T, MELNIKAITIS A, VANAGAS A, *et al.* Tilted-pulse time-resolved off-axis digital holography [J]. *Optics Letter*, 2009, **34**(18): 2715-2717.
- [11] MONEMHAGHDOUST Z, MONTFORT F, EMERY Y, *et al.* Dual wavelength full field imaging in low coherence digital holographic microscopy[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(24): 24005-24022.
- [12] MONEMHAGHDOUST Z, MONTFORT F, CUCHE E, *et al.* Full field vertical scanning in short coherence digital holographic microscope[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(10): 12643-12650.
- [13] MARTINEZ C R, MARTINEZ L L, LANCIS J, *et al.* High-visibility interference fringes with femtosecond laser radiation[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 23016-23024.
- [14] MA Li-hong, WANG Hui, JIN Hong-zhen, *et al.* Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(3): 0309002-0309007.
马利红,王辉,金洪震等.数字全息显微定量相位成像的实验研究[J].中国激光,2012,39(3):0309002-0309007.
- [15] MA Li-hong, WANG Hui, LI Yong, *et al.* Effect of system parameters on the reconstructed image quality in digital holographic microscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 300-307.
马利红,王辉,李勇,等.数字全息显微系统结构参量对再现像质的影响[J].光子学报,2011,40(2):300-307.
- [16] YU Ying-jie, CHEN Gang, DAI Cui-xia, *et al.* Application of phase stitching technique on digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2975-2979.
于瀛洁,陈刚,戴翠霞,等.相位拼接技术在数字全息中的应用[J].光子学报,2009,38(11):2975-2979.
- [17] MANN Christopher J, YU Ling-feng, LO Chun-Min, *et al.* High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(22): 8693-8698.