

基于数字全息显微断层成像的光纤折射率 三维定量测量

苏玲珑 马利红* 王辉 李勇

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 提出了一种定量测量光纤内部折射率三维分布的新方法。基于数字全息显微断层成像技术,构建了一套测量光纤折射率的实验系统,实现了光纤内部折射率分布的三维测量。在预放大透射式数字全息显微系统中,加入样品转动装置,利用样品转动记录 180° 视角内各个角度的显微全息图,然后数值计算出每个角度光纤样品的折射率积分投影,并基于滤波反投影算法重建光纤内部折射率的三维分布。普通单模光纤和熊猫型保偏光纤两组样品的实验结果表明:建立的系统可应用于光纤内部折射率三维分布定量测量。

关键词 全息; 断层成像; 三维折射率测量; 滤波反投影算法

中图分类号 TB87.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1008002

Three-Dimensional Refractive Index Quantitative Measurement for Optical Fiber by Digital Holographic Tomography

Su Linglong Ma Lihong Wang Hui Li Yong

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract A new method to measure the three-dimensional refractive index distribution of optical fiber is proposed. A set of experiment system based on microscopic tomography with sample rotation is set up, which can quantitatively reconstruct the three-dimensional refractive index distribution inside optical fiber. The digital holograms are acquired at regularly-spaced angular positions within 180° viewing angle by the rotating sample in the digital holographic microscopy system of pre-amplification transmission type. Then, the refractive index integral projections for each degree's optical fiber sample is calculated from the holograms. The three-dimensional refractive index distribution of the internal optical fiber is rebuilt by filtered back-projection algorithm. The experimental results of single-mode optical fiber and single-mode polarization maintaining optical fiber with the panda type demonstrate that the established system is feasible and effective in measuring the three-dimensional refractive index distribution of optical fiber.

Key words holography; tomography; three-dimensional refractive index measurement; filtered back-projection algorithm

OCIS codes 090.1995; 110.6955; 110.6960; 180.1655

1 引言

折射率分布是光纤的基本参数之一,光纤的主要传输性能如带宽、色散等都取决于其折射率分布。因此对于一根成品光纤实际的折射率分布进行精确测量是必不可少的。现有的测量方法主要有折射近场法^[1]和干涉法^[2]两大类。折射近场法测量精确、

分辨率高,且技术成熟,已产品化,缺点是需专门设备将光纤切断、端面抛光,且每次只能测量一个截面。干涉法由于不破坏光纤,已被广泛关注。但干涉法测量得到的是折射率的积分,因而只能获取光纤的平均折射率。

数字全息显微断层成像技术^[3-4]是数字全息显

收稿日期: 2013-03-18; 收到修改稿日期: 2013-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61205012)、浙江省自然科学基金(LQ12F05002)、浙江师范大学创新团队项目

作者简介: 苏玲珑(1987—),男,硕士研究生,主要从事数字全息技术方面的研究。E-mail: easy7546758@126.com

导师简介: 王辉(1958—),男,博士,教授,主要从事信息光学和数字全息技术等方面的研究。E-mail: wh@zjnu.cn

* 通信联系人。E-mail: zjnumch@zjnu.cn

微成像技术^[5-12]和计算机断层成像技术^[13]的结合,即采用数字全息显微术获取不同角度的被测样品折射率积分,再利用断层成像重建技术得到样品内部的折射率三维分布。采用数字全息显微术获取被测样品的折射率积分,和干涉法相比,数字全息显微术只需单帧全息图即可获取样品的折射率积分,对于成型仪器,无需在防震台环境下操作。而干涉法一般需要三帧及以上的干涉图,即使是成型仪器也需要在防震台环境下操作,动态干涉仪虽然不需要防震台环境,但是需要采用高精密的像素偏振器件,因而数字全息显微术具有速度快、对环境要求低、设备简单等优势。国外近几年对数字全息显微断层成像技术的研究较多,主要应用在生物组织折射率三维重建或与折射率变化相关的物理量测量^[3-4,14-18]及重建算法研究^[19-20]、重建误差分析^[21]等。国内在该领域内的研究尚处于起步阶段,上海大学周文静等^[22]提出了少量投影的内部折射率重建,但仅在数值模拟实验上实现了单一折射率样品的重建。

本文基于数字全息显微断层成像技术,构建了一套光纤折射率测量实验系统,实现了光纤内部折射率分布的三维测量。在预放大透射式数字全息显微系统中,加入样品转动装置,利用样品转动记录

180°视角内各个角度的显微全息图,然后数值计算出每个角度光纤样品的折射率积分投影,并基于滤波反投影算法重建光纤内部的折射率分布。普通单模光纤和熊猫型保偏光纤两组样品的实验结果表明,建立的系统能定量测量出光纤内部的折射率三维分布。

2 数字全息显微断层成像原理

基于数字全息显微断层成像的光纤折射率测量系统原理如图 1 所示。光路基本结构和透射式数字全息显微成像系统相同,用分束棱镜(BS1)将激光束分成两束,一束照明样品并经显微物镜(MO)放大作物光波,另一束作参考光,两束光又经分束棱镜(BS2)合束,在 CCD 相机记录平面相遇干涉形成全息图。CCD 相机可置于显微放大像的像平面或像平面前后。两个连续衰减片(NF)可进一步调节物光波和参考光波的强度。以上各参数的优化设计参考文献[23]。不同的是,样品置于精密转动平台中心,并通过控制软件实现平台转动和 CCD 相机曝光的控制,自动记录 180°视角内各个角度的数字显微全息图。

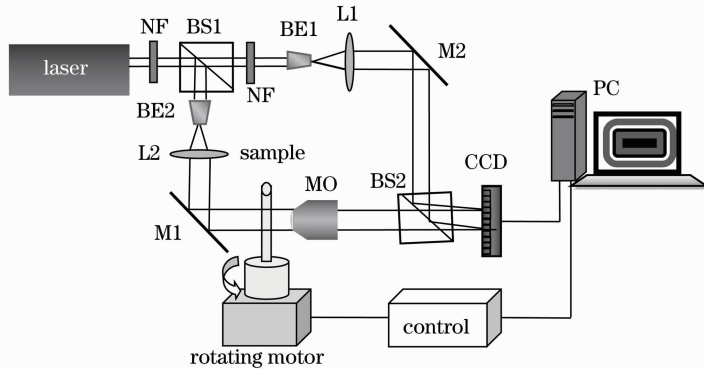


图 1 基于数字全息显微断层成像的光纤折射率测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of refractive index measurement for optical fiber by digital holographic microscopic tomography

2.1 数字全息显微相位成像的基本原理

数字全息显微术是数字全息术和显微技术的结合。利用显微物镜对被测样品进行放大成像,即把物光场空间频率压缩到 CCD 采样频率,从而突破现有 CCD 器件空间采样频率低的制约,使成像横向分辨率达到显微物镜的衍射极限。数字全息术仍旧是数字全息显微术的核心技术。把显微放大的实像看作被记录物体,像平面和 CCD 之间的距离看作记录距离。从显微放大像发出的物光波和参考光波在 CCD 记录平面相干叠加,形成显微全息图。

该数字化全息图输入计算机后,通常采用数字图像处理技术进行滤波等预处理,滤除零级项和共轭项,得到只包含物光波的复数全息图。然后基于基尔霍夫衍射积分公式,数值模拟物光波从全息图平面到再现平面的衍射传播,得到再现平面的物光波复振幅分布。常用的重建算法有菲涅耳变换重建法、角谱重建法和卷积重建法。像面全息图是一种特殊情况,无需再进行衍射传播计算。由再现物光波复振幅分布,可以同时得到重构像的光强和相位分布:

$$I(x_i, y_i) = |U(x_i, y_i)|^2, \quad (1)$$

$$\varphi(x_i, y_i) = \arctan \left[\frac{\text{Im} U(x_i, y_i)}{\text{Re} U(x_i, y_i)} \right], \quad (2)$$

式中 $U(x_i, y_i)$ 表示重构平面的物光场复振幅分布, Re 表示取复振幅的实部, Im 表示取虚部。由(2)式得到的相位值分布在 $(-\pi, \pi]$ 区间, 是包裹相位值。因此, 一般情况下, 要得到物光场的真实相位分布通常还需要进行解包裹计算。文中采用质量图导向的查表法快速相位解包裹算法^[24]。

另外, 在预放大全息显微系统中, 要得到样品的相位, 必须消除附加相位, 包括显微物镜引入的附加相位以及数字照明光波和原照明光波的倾斜误差引入的相位差等。本系统采用减去参考平面全息图相位的方法获取样品的相位^[25]。

2.2 数字全息显微断层成像基本原理

数字全息显微断层成像技术是基于数字全息显微术的断层技术, 就是利用投影断层重建技术将不同角度数字全息显微成像获得的波前相位信息包含的折射率积分数据逐一解出, 以获得样品内部折射率的三维分布。

在样品折射率变化比较小的情况下, 光波在样品中的传播可近似认为是直线传播, 在平行光垂直入射样品时, 由数字全息显微成像得到的相位分布是样品折射率和样品厚度积分的结果:

$$\varphi(x_i, y_i) = \frac{\int_l [n(x, y, z) - n_0] dl}{\lambda} 2\pi, \quad (3)$$

式中 $\varphi(x_i, y_i)$ 是通过数字全息显微术获取的相位分布, $n(x, y, z)$ 是样品的折射率分布, n_0 是周围介质的折射率, l 是光波通过样品的几何路径, λ 是光波波长。由(3)式可得到样品的折射率积分投影数据为

$$p_n(x_i, y_i) = \frac{\varphi(x_i, y_i)}{2\pi} \lambda = \int_l [n(x, y, z) - n_0] dl. \quad (4)$$

如图1所示, 通过转动样品, 可以获取各个角度的样品折射率积分投影数据。在数据完全的前提下, 可以利用以 Radon 逆变换为基础的滤波反投影算法重建样品内部的折射率分布, 重建函数为

$$n(x, y, z) = \int_0^\pi d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} |w| P_n(w, \alpha) \exp(i2\pi wx) dw, \quad (5)$$

式中 w 是空间频率, α 是投影角度, $P_n(w, \alpha) = F\{p_n(x_i, y_i, \alpha)\}$, 是待建函数在 α° 下的折射率积分

投影数据的傅里叶变换, 函数 $|w|$ 是投影重建的滤波函数。由于理想滤波函数 $H(w) = |w|$ 的不可实现性, 使用 Ram-Lak 滤波器, 其函数表达式为

$$H_{R-L}(w) = |w| \text{rect}[w/(2B)] = \begin{cases} |w|, & |w| < B = 1/(2d) \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (6)$$

将滤波区间限制在 $(-\frac{1}{2d}, \frac{1}{2d})$ 的范围内, 其中 d 为 CCD 的采样间隔。

3 实验结果

实验系统装置如图2所示。系统中光源采用上海高益公司的 DPGL-2100F 型固体激光器, 波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 。使用的 CCD 相机像素尺寸是 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。根据光纤样品频率特点, 显微物镜选用 $10 \times / 0.25$ 的商用显微物镜。CCD 记录平面置于显微成像平面。经 USAF1951 标准分辨率版测试, 系统的实际放大倍率为 9.1。样品浸没在装有纯甘油溶液的液体盒中, 使光线在样品内外保持直线传播。样品置于转动平台中心, 采用的转动平台是卓立汉光 RSA60, 转动最小角度是 0.0003125° 。对于直径约为 $125 \mu\text{m}$ 的光纤样品, 在放大倍率为 9.1 时, 最小角度引起的横向误差只有 $0.002 \mu\text{m}$, CCD 不能分辨。样品每转动 1° 记录 1 frame 全息图, 共记录 180 frame。同时, 记录了光纤样品不存在时的参考全息图。

首先对普通单模光纤的折射率三维分布进行了测量。记录的单帧全息图如图3(a)所示, 对全息图进行了频域滤波, 由于是像面全息图, 所以只需再经逆傅里叶变换就得到重构物光波复振幅。对物光波复振幅求反正切值得到包裹相位, 利用基于质量图导向的查表法快速相位解包裹算法进行解包裹运算, 并采用减去参考平面相位像的方法进行相位补偿, 得到的相位像如图3(b)所示。再现相位像中光纤的直径占 330 pixel, 计算所得光纤直径为 $125 \mu\text{m}$, 与实际值符合。经(4)式计算即可得到折射率积分投影数据。理想情况下, 对每帧全息图进行相同的数据处理, 即可得到 180° 视角下每隔 1° 的折射率积分投影数据。但是, 在实验过程中, 由于光纤在转动平台位置的非完全居中以及光纤的微小摆动等会导致光纤转动后出现纵向离焦和横向位置偏移误差, 所以还需要对转动后拍摄的全息图进行数字聚焦和横向位置对齐的处理。采用两个步骤来消

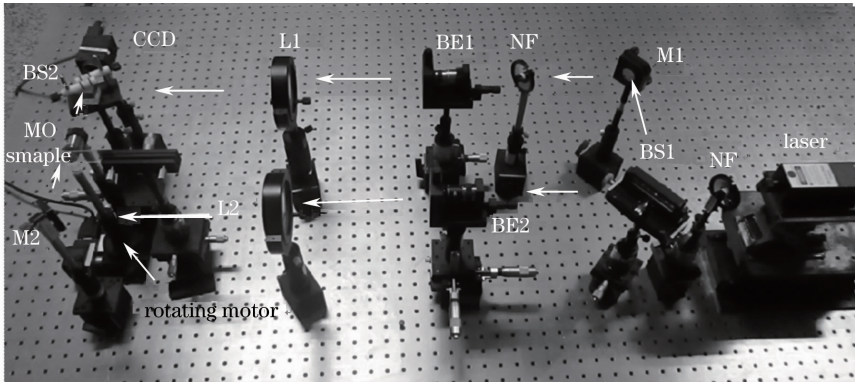


图 2 基于数字全息显微断层成像的光纤折射率测量系统装置图

Fig. 2 Experimental setup drawing for refractive index measurement for optical fiber by digital holographic microscopic tomography

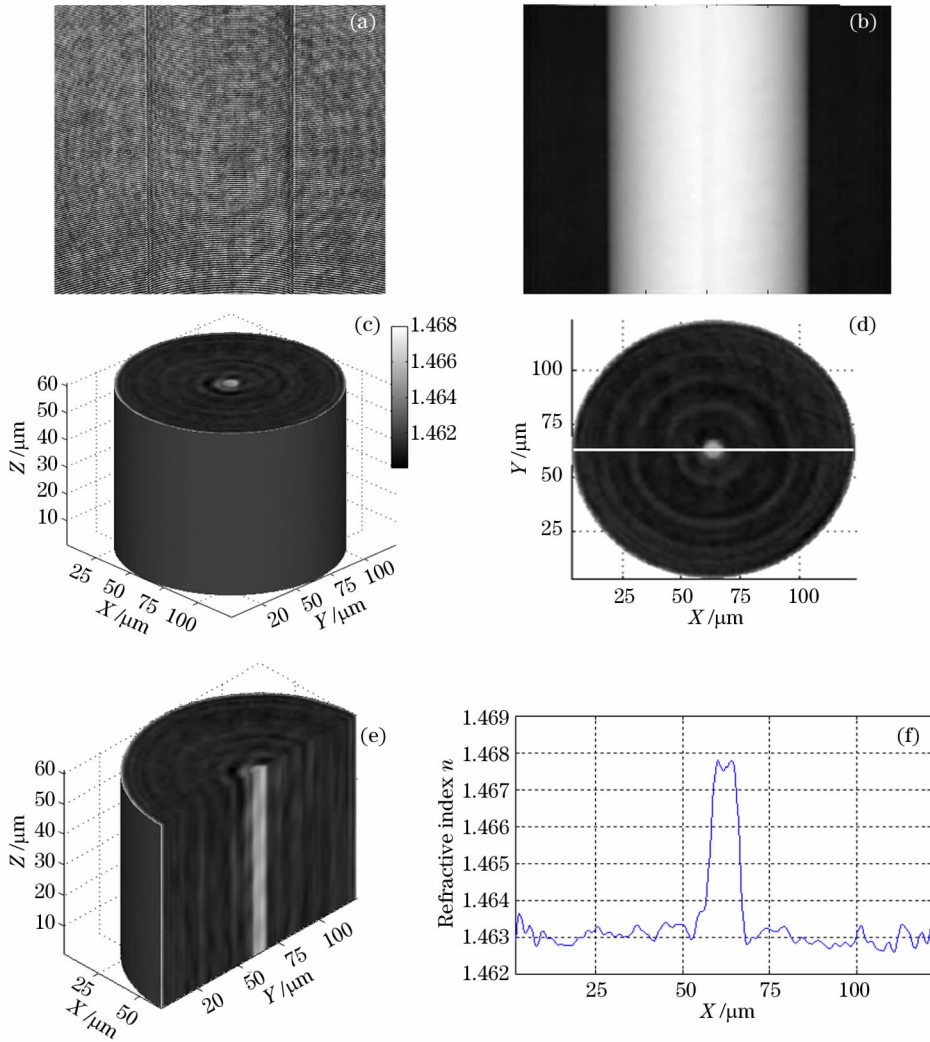


图 3 单模光纤实验结果。(a) 部分全息图；(b) 相位图；(c) 三维折射率分布图；(d) 横剖面折射率分布图；

(e) 纵剖面折射率分布图；(f) 为图 3(d) 图横剖面中沿所画光纤直径方向的折射率分布曲线

Fig. 3 Experimental results of single-mode optical fiber. (a) Part of hologram; (b) reconstructed phase image; (c) distribution diagram of three-dimensional refractive index; (d) refractive index distribution profile of transverse section; (e) refractive index distribution profile of longitudinal section; (f) refractive index distribution curve of the diametrical direction along with the fiber described in the transverse section of Fig. 3 (d)

除这种转动误差,第一步采用角谱重建算法进行物光场重建,采用强度像灰度值变化最小的聚焦方法进行数字聚焦^[26];第二步采用相位像边缘对齐的方法进行横向位置对齐^[27];最后采用滤波反投影算法,重建得到光纤内部折射率的定量三维分布,如图3(c)所示。图3(d)为光纤横剖面折射率分布图,图3(e)为光纤纵剖面折射率分布图,图3(f)为图3(d)横剖面中沿所画光纤直径方向的折射率分布曲线。通过计算相应区域折射率分布的平均值得得,光纤包层的折射率分布在1.4630左右,而纤芯在1.4677左右。

为进一步证实系统能有效地测量光纤内部折射

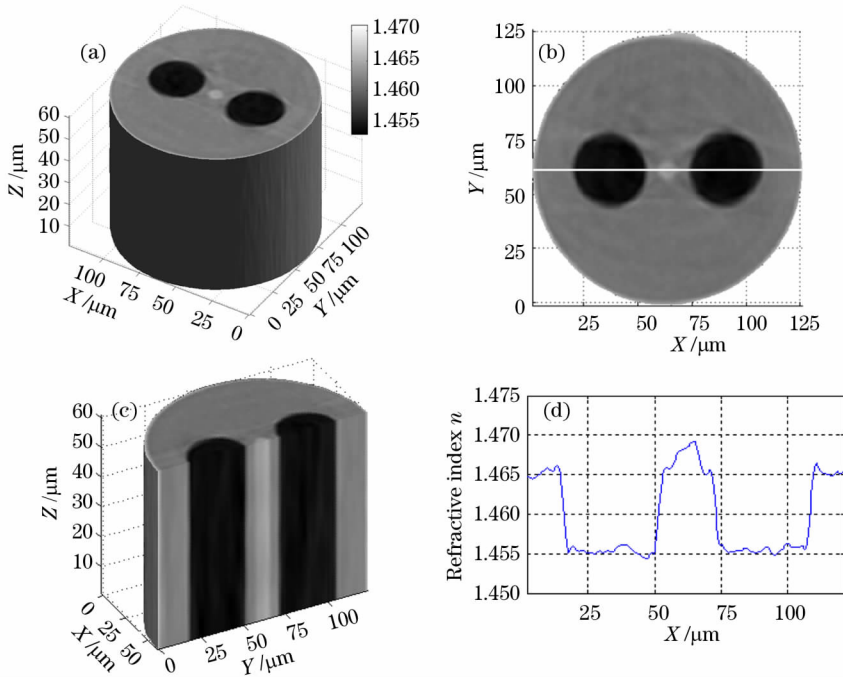


图4 熊猫型保偏光纤实验结果。(a) 三维折射率分布图;(b) 横剖面折射率分布图;(c) 纵剖面折射率分布图;(d) 为图4(b)图横剖面中沿所画光纤直径方向的折射率分布曲线

Fig. 4 Experimental results of panda type polarization maintaining optical fiber. (a) Three-dimensional refractive index distribution profile; (b) refractive index distribution profile of transverse section; (c) refractive index distribution profile of longitudinal section; (d) refractive index distribution profile along with the diametrical direction of the optical fiber shown in Fig. 4(b)

4 结 论

针对光纤内部折射率三维分布的检测,构建了数字全息显微断层成像系统,利用样品转动采集180°视角下各个角度的显微全息图,通过物光场数值重建、相位解包裹、相位补偿、转动误差补偿等计算得到各个角度的折射率积分投影数据,最后基于滤波反投影重建技术得到光纤内部折射率的三维值。实验结果表明,该系统能定量测量光纤内部折

率分布,对具有更复杂结构的熊猫型保偏光纤的折射率分布进行了测量。实验结果如图4所示,图4(a)是保偏光纤的三维折射率分布图;图4(b)是保偏光纤横剖面折射率分布图;图4(c)是保偏光纤纵剖面折射率分布图;图4(d)为图4(b)图横剖面中沿所画光纤直径方向的折射率分布曲线。通过计算相应区域折射率分布的平均值得到,两个圆形的应力区对称地分布在纤芯两侧,折射率约为1.4554,而纤芯和包层的折射率分别为1.4686和1.4651左右。以上两组实验结果表明,建立的实验系统可用于光纤内部折射率三维分布的测量。

射率的三维分布。事实上,该系统不仅为光纤的内部折射率三维分布测量提供了一种有效的方法,也为其他显微样品的内部折射率精确测量提供了一种有效的方法。而且,该测量方法是基于数字全息显微术的断层成像技术,由于成型的数字全息显微镜可在非防震环境下操作,而样品转动误差又可以数字校正,因此该方法仪器化后,有很大的应用优势和前景。在下一步的工作中,将进一步研究系统的测

量准确度、精度、可重复性,以及如何在保证重建图像质量的情况下减少全息图的拍摄角度,以提高测量速度。

参 考 文 献

- 1 N Gisin, R Passy, B Perny. Optical fiber characterization by simultaneous measurement of the transmitted and refracted near field[J]. *J Lightwave Technol*, 1993, 11(11): 1875—1883.
- 2 A A Hamza, T Z N Sokkar, M A El-Bakary. Determining the optical properties of highly oriented fibres using a multiple-beam technique[J]. *J Opt A: Pure & Appl Opt*, 2001, 3(5): 421—427.
- 3 Florian Charrière, Anca Marian, Frédéric Montfort, *et al.*. Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(2): 178—180.
- 4 Wonshik Choi, Christopher Fang-Yen, Kamran Badizadegan, *et al.*. Tomographic phase microscopy[J]. *Natural Methods*, 2007, 4(9): 717—719.
- 5 Etienne Cuche, Frédéric Bevilacqua, Christian Depeursinge. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(5): 291—293.
- 6 L H Ma, H Wang, Y Li, *et al.*. Partition calculation for zero-order and conjugate image removal in digital in-line holography [J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1805—1815.
- 7 T Kozacki, M Józwick, Lizewski K. High-numerical-aperture microlens shape measurement with digital holographic microscopy [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(22): 4419—4421.
- 8 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309002.
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.
- 9 V Chhaniwal, A S G Singh, R A Leitgeb, *et al.*. Quantitative phase-contrast imaging with compact digital holographic microscope employing Lloyd's mirror[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(24): 5127—5129.
- 10 M H Jericho, H J Kreuzer, M Kanka, *et al.*. Quantitative phase and refractive index measurements with point-source digital in-line holographic microscopy [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(10): 1503—1515.
- 11 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412003.
王云新, 王大勇, 赵洁, 等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412003.
- 12 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of chinese medical decoction pieces[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0209002.
王华英, 郭中甲, 张志会, 等. 基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209002.
- 13 Jiang Hsieh. *Computed Tomography. Principle, Design, Artifacts and Advances*[M]. Zhang Chaozong Transl. Beijing: Science Press, 2006.
Jiang Hsieh. 计算机断层成像技术:原理、设计、伪像和进展[M]. 张朝宗译. 北京: 科学出版社, 2006.
- 14 Yongjin Sung, Wonshik Choi, Christopher Fang-Yen, *et al.*. Optical diffraction tomography for high resolution live cell imaging[J]. *Opt Express*, 2009, 17(1): 266—277.
- 15 Florian Charrière, Nicolas Pavillon, Tristan Colomb, *et al.*. Living specimen tomography by digital holographic microscopy: morphometry of testate amoeba[J]. *Opt Express*, 2006, 14(16): 7005—7013.
- 16 O Haerle, K Belkebir, H Giovannini, *et al.*. Tomographic diffractive microscopy: basics, techniques and perspectives[J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(9): 686—699.
- 17 Gorski W, Osten W. Tomographic imaging of photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(14): 1977—1979.
- 18 Vertu Stanislas, Flügge Jens, Delaunay Jean-Jacques, *et al.*. Improved and isotropic resolution in tomographic diffractive microscopy combining sample and illumination rotation [J]. *Central European Journal of Physics*, 2011, 9(4): 969—974.
- 19 Guo P, Devaney A J. Comparison of reconstruction algorithms for optical diffraction tomography[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(11): 2338—2347.
- 20 G R Myers, D M Paganin, T E Gureyev, *et al.*. Phase-contrast tomography of single-material objects from few projections[J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 908—919.
- 21 Shan Kou, Colin J R. Image formation in holographic tomography[J]. *Opt Express*, 2008, 33(20): 2362—2364.
- 22 Zhou Wenjing, Hu Wentao, Guo Lu, *et al.*. Experimental study of digital holographic tomography by a few projections[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8499—8511.
周文静, 胡文涛, 郭路, 等. 少量投影数字全息层析重建实验研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(12): 8499—8511.
- 23 Ma Lihong, 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—306.
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—306.
- 24 L Ma, Y Li, H Wang, *et al.*. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping in digital holographic microscopy[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(36): 8800—8807.
- 25 Ferraro P De, Nicola S, Finizio A, *et al.*. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(11): 1938—1946.
- 26 Langehanenberg P, Kemper B, Dirksen D, *et al.*. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(19): 176—182.
- 27 Yunseong Jeon, Chungki Hong. Rotation error correction by numerical focus adjustment in tomographic phase microscopy[J]. *Opt Eng*, 2009, 48(10): 105801.

栏目编辑:何卓铭