

# 反射式同轴非相干数字全息显微成像系统研究

刘亚飞 张文斌 许天旭 田勇志 郭茂田 梁二军 马凤英

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 当前,数字全息显微主要采用相干性好的激光作为光源,对设备及环境条件要求较高,且会在全息图中引入大量的散斑噪声和寄生干涉条纹。基于非相干光照明下的数字全息可以很好地解决以上问题。采用非相干光作为光源,空间光调制器和 CCD 组成非相干干涉仪作为全息记录模块,从波动光学角度分析了该模块的记录及再现原理,给出了系统的点扩展函数、横向放大率和再现距离。采用该模块结合物镜搭建了反射式同轴非相干数字全息显微成像系统。利用该系统对分辨率板成像,获得与传统宽场光学显微镜相当的空间分辨率。对  $300\sim 500\ \mu\text{m}$  单颗粒金刚石进行全息拍摄,在不同平面实现了数字聚焦。结果表明,该系统可以快速获取微小物体的三维空间信息,在医学检测、材料分析等领域具有广阔的应用前景。

**关键词** 全息; 数字全息; 非相干干涉仪; 数字全息显微; 空间分辨力; 三维成像

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1109002

## Study on In-Line Incoherent Digital Holographic Microscopy in Reflection Configuration

Liu Yafei Zhang Wenbin Xu Tianxu Tian Yongzhi Guo Maotian

Liang Erjun Ma Fengying

College of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

**Abstract** Currently, the digital holographic microscopy mainly uses a laser with good coherence as the light source, it needs high equipment and environmental condition, and a large amount of speckle noise and parasitic interference fringes can be introduced in the hologram. The digital holography based on incoherent light is a good way to solve those problems. The incoherent light is used as light source, and the spatial light modulator as well as the CCD composes the incoherent interference for recording holograms. The recording and reconstructed principles of the module are analyzed from the angle of wave optics and the point spread function, the axial magnification and the reconstruction distance of the system are given. Combined with the microscope objective, the system of in-line incoherent digital holographic microscopy in reflection configuration is established. Using this system to experiment on resolution imaging, a high spatial resolution as good as the traditional wide-field optical microscopy is obtained. The holograms of one diamond whose size is between  $300\ \mu\text{m}$  and  $500\ \mu\text{m}$  are captured and digital focused in different planes. The results show that the proposed system can obtain three-dimensional spatial information of small objects simply and rapidly. It has limitless applications in medical tests, material analysis and other fields.

**Key words** holography; digital holography; incoherent interferometer; digital holographic microscopy; spatial resolution; three-dimensional imaging

**OCIS codes** 090.1995; 180.3170; 350.5730

收稿日期: 2016-07-18; 收到修改稿日期: 2016-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61307019)、河南省教育厅重点项目(14A140003, 15A140038, 16A140035)、河南省科技厅(142300410225)

作者简介: 刘亚飞(1991—),女,硕士研究生,主要从事非相干数字全息显微方面的研究。E-mail: liuyafeizhu@163.com

导师简介: 马凤英(1975—),女,博士,副教授,主要从事非相干数字全息成像方面的研究。

E-mail: mafy@zzu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引言

全息术能够记录完整的物光场信息,实现空间三维成像,具有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。传统全息术要求系统具备高相干性光源,不仅会引入严重的相干噪声<sup>[5]</sup>,而且记录条件极为苛刻,极大地限制了全息术在更多领域的应用。Mertz等<sup>[6]</sup>根据Rogers<sup>[7]</sup>所发现的点源全息图与非涅耳波带片结构相似这一理论提出了一种非相干光照明全息成像技术,此后非相干全息术得到了持续不断的研究和发展。1967年,Goodman等<sup>[8]</sup>提出数字全息技术的思想,随后,电荷耦合器件(CCD)的出现促进了数字全息术的发展。Kim<sup>[9]</sup>对非相干三角数字全息中的相移误差补偿、分辨率等问题进行了研究。Kim<sup>[10]</sup>改进迈克耳孙干涉光路,实现了自然光照明下远距离彩色物体的全息记录与再现。李德阳等<sup>[11]</sup>研究了基于迈克耳孙干涉仪的同轴非相干数字全息成像系统,结合广义相移算法获得了清晰的数值重建像。万玉红等<sup>[12]</sup>对非相干光全息的成像特性和研究进展进行了总结。2007年,Rosen等<sup>[13]</sup>提出了一种基于空间光调制器(SLM)的非相干数字全息成像技术,命名为菲涅耳非相干相关全息术(FINCH),采用该系统实现了对反射式物体和荧光彩色物体的全息记录<sup>[14-16]</sup>。Bouchal等<sup>[17-19]</sup>研究了FINCH系统的点扩展函数(PSF)和分辨率,通过增大物光波和参考光波的干涉面积,提高了FINCH系统的分辨率,并提出一种螺旋相位调制模式,实现了FINCH技术中对重建像的边缘增强。Naik等<sup>[20]</sup>则对自发光物体提出了一种萨尼亚克干涉分光,Pockels盒实现相移的全息记录与再现,并从新的角度对实验过程进行了理论解释。刘英臣等<sup>[21-22]</sup>对FINCH技术的记录以及再现过程进行了模拟分析和实验验证。Lai等<sup>[23]</sup>也分别对提高FINCH系统的信噪比及边缘对比度进行了分析。Qin等<sup>[24]</sup>通过低通滤波去除零级项,利用两幅全息图的叠加消除孪生像,获得了清晰的重建像,实现了两部相移法在FINCH中的应用。石侠等<sup>[25]</sup>研究了FINCH系统的成像特性,对两个非荧光骰子进行三维全息拍摄,实现了物光场不同平面处的清晰再现。本文搭建了基于SLM的反射式同轴非相干数字全息显微成像系统,利用该系统对分辨率板成像,获得与传统宽场光学显微镜相当的空间分辨率。对300~500 μm单颗粒金刚钻(300~500 μm是指金刚钻的大小可以通过500 μm的筛孔而通不过300 μm的筛孔,即金刚钻大小介于300~500 μm之间)进行全息拍摄,在不同平面实现了数字聚焦。结果表明,这种同轴非相干数字全息显微系统可以快速获取微小物体的三维空间信息,在医学检测、材料分析等领域具有广阔的应用前景。

## 2 反射式同轴非相干数字全息显微记录原理

反射式同轴非相干数字全息显微实验光路如图1所示。从氙灯发出的非相干光经分光棱镜BS1和显微物镜MO入射到待测物体表面,经物体反射后的光通过物镜MO得到待测物体的放大像。该放大像作为同轴非相干数字全息记录系统的输入物,其发射光经准直透镜L后入射到SLM表面。实验过程中采用的是纯相位液晶空间光调制器,通过计算机编程控制SLM,实现SLM上不同模式相位掩模的加载,如单透镜掩模(SLM的一半像素上加载球面波相位因子,一半像素上加载的是平面波相位因子)和双透镜掩模(SLM上一半像素加载球面波相位因子,另一半像素上加载不同曲率半径的球面波相位因子)。本文SLM上加载双透镜掩模,一半像素加载焦距为 $f_{d1}$ 的透镜相位,一半像素加载焦距为 $f_{d2}$ 的透镜相位,将来自于输入物体上同一点的光波分为两束,利用这两束光的空间自相干性实现点源全息图(点扩展函数)的记录,所有点源全息图非相干叠加后被CCD记录以获得输入物体的全息图。

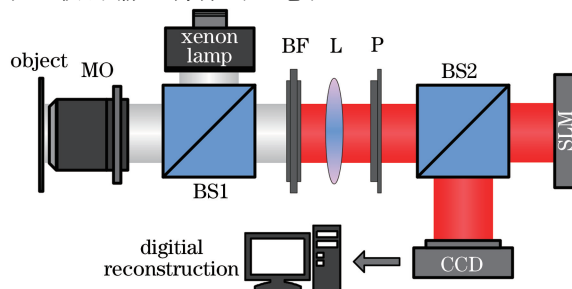


图1 反射式同轴非相干数字全息显微实验光路

Fig. 1 Experimental setup of in-line incoherent digital holographic microscopy in reflection configuration

为方便分析,将系统简化为图 2 所示的示意图。纯相位反射式 SLM 上加载波长为  $\lambda$ 、焦距分别为  $f_{d1}$  和  $f_{d2}$  的两个透镜相位,其复振幅反射系数为

$$R = \frac{1}{2} \exp(i\theta) Q\left(-\frac{1}{f_{d1}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(-\frac{1}{f_{d2}}\right), \quad (1)$$

式中  $Q(b) = \exp[i\pi b \lambda^{-1}(x^2 + y^2)]$ ,  $\theta$  为附加相移常数,透镜 L(焦距  $f_0$ ) 与 SLM 的距离记为  $d$ ,从波动光学角度分析,可得到系统的点扩展函数。

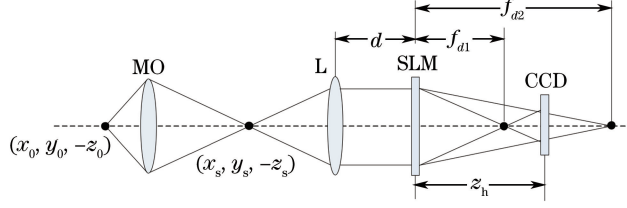


图 2 反射式同轴非相干数字全息显微记录光路示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of in-line incoherent digital holographic microscopy in reflection configuration

设三维物体表面任一点坐标为  $s(x_0, y_0, -z_0)$ , 发出的光经显微物镜 MO 放大后成像于点  $p(x_s, y_s, -z_s)$ , 则  $p$  点经系统后在 CCD 记录面上的强度分布即为点扩展函数, 表示为

$$I_{\text{psf}}(x, y; x_s, y_s) = \exp\left\{\frac{-i\pi[(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]}{\lambda z_s}\right\} \times \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda f_0}(x^2 + y^2)\right] * \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \times \\ \left\{\frac{1}{2} \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda f_{d1}}(x^2 + y^2)\right] + \frac{1}{2} \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda f_{d2}}(x^2 + y^2) + i\theta\right]\right\} * \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda z_h}(x^2 + y^2)\right] = \\ C + C_1 \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r}[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta\right\} + \\ C_1^* \exp\left\{\frac{-i\pi}{\lambda z_r}[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] - i\theta\right\}, \quad (2)$$

式中“ $*$ ”代表卷积运算;  $C, C_1$  均为常数,  $C_1^*$  是  $C_1$  的复共轭;  $f_e = \frac{z_s f_0}{f_0 - z_s}$ ;  $f_{1,2} = \frac{f_{d1,2}(f_e + d)}{f_{d1,2} - (f_e + d)}$ ;

$M_T = -\frac{z_h f_e}{z_s(f_e + d)}$  为系统的横向放大率, 再现距离为

$$z_r = \frac{(f_1 + z_h)(f_2 + z_h)}{f_2 - f_1}. \quad (3)$$

若输入物体(系统中间像)表面的反射强度分布为  $g(x_s, y_s, z_s)$ , 改变 SLM 的相移常数, CCD 上记录相移常数分别为  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的三张全息图为

$$H_1(x, y) = C \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + \\ C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r}[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta_1\right\} dx_s dy_s dz_s + c.c., \quad (4)$$

$$H_2(x, y) = C \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + \\ C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r}[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta_2\right\} dx_s dy_s dz_s + c.c., \quad (5)$$

$$H_3(x, y) = C \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + \\ C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r}[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta_3\right\} dx_s dy_s dz_s + c.c., \quad (6)$$

式中  $c.c.$  为等号右侧第二项的复共轭。

采用三步相移技术<sup>[26]</sup>, 去除孪生像和零级像, 得到的复值全息图为

$$H_F(x, y) = H_1(x, y) [\exp(\pm i\theta_3) - \exp(\pm i\theta_2)] + H_2(x, y) [\exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] + H_3(x, y) [\exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_1)] = C_2 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{\mp i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2]\right\} dx_s dy_s dz_s, \quad (7)$$

式中  $C_2$  为一个关于  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的复值常数。

在计算机中模拟衍射过程,采用角谱衍射算法<sup>[27]</sup>对复值全息图进行数值再现,得到消除零级像和共轭像的再现像,即

$$S(x, y, z_r) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[H_F(x, y)] \exp\left[ikz_r \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}\right]\right\}, \quad (8)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换,  $f_x$  和  $f_y$  为与  $x, y$  对应的频域坐标。

### 3 实 验

采用连续光谱氙灯(CEL-TCX250, 250 W)作为光源,进入光路的光斑半径约为 1 cm。实验装置与图 1 相同。CCD(Hamamatsu Digital Camera C8484-05G02)像素尺寸为  $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ ,像素点数为  $1024 \times 1344$ 。为便于后续算法进行快速傅里叶变换,实现全息图的高效重建,拍摄时 CCD 只使用了  $1024 \times 1024$  像素点。准直透镜 L 的焦距为 250 mm;BF 为中心波长为 632.8 nm、带宽为 20 nm 的窄带滤光片;BS1 和 BS2 为分光棱镜,BS1 的作用是将光源发出的光反射到待测物体上,再经物体反射后进入光路,BS2 的作用是让 SLM 调制反射的光有效地进入探测器中,同时缩短光路的长度;P 为偏振片,偏振方向与 SLM 的液晶长轴方向一致。显微物镜 MO 放大倍率为 20,数值孔径(NA)为 0.4。SLM 和 CCD 之间的距离  $z_h$  需与 SLM 上加载的透镜焦距相匹配,获得最佳干涉效果<sup>[17]</sup>。实验 1:分辨率板放在显微物镜 MO 前 5.5 mm 附近,与透镜 L 的距离为 260 mm;SLM 加载的双透镜相位掩模的焦距分别为  $f_{d1} = 470 \text{ mm}$ ,  $f_{d2} = 523 \text{ mm}$ ;  $z_h = 495 \text{ mm}$ 。实验 2:对  $300 \sim 500 \mu\text{m}$  单颗粒金刚钻进行全息拍摄,SLM 加载的双透镜相位掩模的焦距分别为  $f_{d1} = 245 \text{ mm}$ ,  $f_{d2} = 255 \text{ mm}$ ;  $z_h = 283 \text{ mm}$ ;其他参数与实验 1 相同。实验 1 和实验 2 中的不同双透镜相位掩模的焦距大小针对拍摄物体的大小进行设置。

## 4 结果与分析

### 4.1 实验 1

制作相位常数分别为  $0^\circ, 120^\circ$  和  $240^\circ$ , 焦距  $f_{d1} = 470 \text{ mm}$ ,  $f_{d2} = 523 \text{ mm}$  的相位掩模,如图 3 所示。

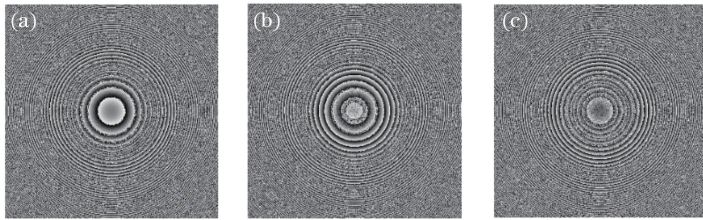


图 3 SLM 上加载的相位掩模。(a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 120^\circ$ ; (c)  $\theta = 240^\circ$

Fig. 3 Phase masks of the SLM. (a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 120^\circ$ ; (c)  $\theta = 240^\circ$

采用图 1 所示系统对 USAF 标准分辨率板进行实验。其中,  $f_{d1} = 470 \text{ mm}$ ,  $f_{d2} = 523 \text{ mm}$ ,  $z_h = 495 \text{ mm}$ , 如图 4 所示。图 4(a)~(c)分别是相位常数为  $0^\circ, 120^\circ$  和  $240^\circ$  时的全息图,图 4(d)为高分辨率重建像,图 4(e)为原始像,图 4(f)为图 4(e)中矩形框内部分放大,图 4(g)为图 4(d)中矩形框内部分放大。从图 4(f)和(g)中可以看到,该系统在非相干光照明下能够获得与传统宽场光学显微镜相当的空间分辨率,为 512 lp/mm。

### 4.2 实验 2

制作相位常数分别为  $0^\circ, 120^\circ$  和  $240^\circ$ , 焦距  $f_{d1} = 245 \text{ mm}$ ,  $f_{d2} = 255 \text{ mm}$  的相位掩模,如图 5 所示。

$300 \sim 500 \mu\text{m}$  单颗粒金刚钻在不同焦平面的原始像如图 6 所示,其中图 6(a)~(c)分别为介于前焦面和后焦面之间、后焦面和前焦面原始像,采用图 1 所示系统,调整部分参数,令  $f_{d1} = 245 \text{ mm}$ ,  $f_{d2} = 255 \text{ mm}$ ,  $z_h = 283 \text{ mm}$ ,对  $300 \sim 500 \mu\text{m}$  单颗粒金刚钻进行全息拍摄,如图 7 所示。图 7(a)~(c)分别是相位常数为

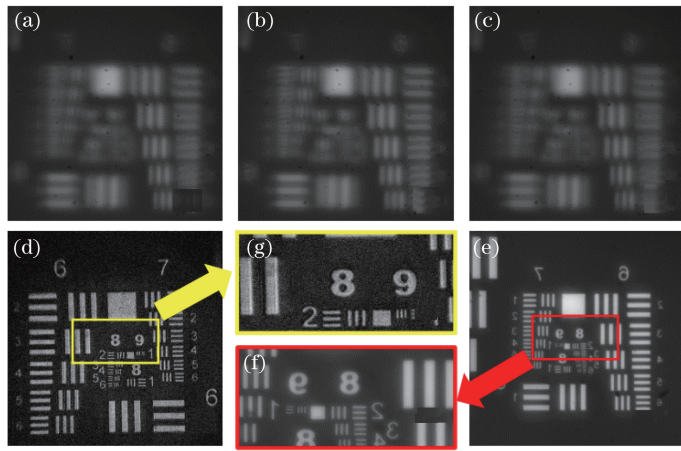


图 4 分辨率板的全息图、重建像和原始像

Fig. 4 Holograms, reconstructed images and original images of resolution plane

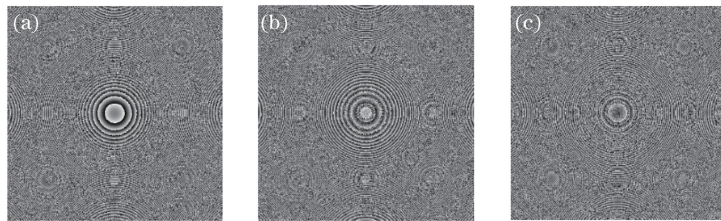


图 5 SLM 上加载的相位掩模。(a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=120^\circ$ ; (c)  $\theta=240^\circ$

Fig. 5 Phase mask of the SLM. (a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=120^\circ$ ; (c)  $\theta=240^\circ$

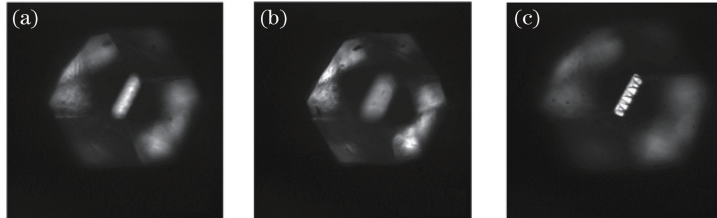


图 6 300~500  $\mu\text{m}$  单颗粒金刚石在不同焦平面的原始像

Fig. 6 Original images of one diamond with size of 300~500  $\mu\text{m}$  at different focus planes

$0^\circ, 120^\circ$  和  $240^\circ$  时的全息图, 图 7(d) 为最佳前焦面的重建像, 图 7(e) 为最佳后焦面的重建像, 图 7(f) 为图 7(d) 中矩形框内部分放大, 图 7(g) 为图 7(e) 中矩形框内部分放大。从图 7(f) 和 (g) 中可以看出, 对 300~

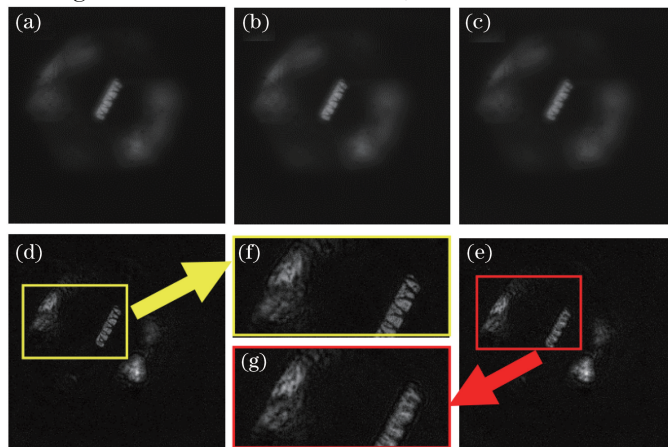


图 7 300~500  $\mu\text{m}$  单颗粒金刚石的全息图和重建像

Fig. 7 Holograms and the reconstructed images of one diamond with size of 300~500  $\mu\text{m}$

500  $\mu\text{m}$ 单颗粒金刚钻进行全息拍摄,可以在不同平面实现数字聚焦。结果表明,在计算机中对全息图进行数字再现,能够实现对物光场任意平面的数字聚焦,该系统可以实现真实微小三维物体的非相干全息拍摄与重构。

## 5 结 论

基于 SLM 的反射式同轴非相干数字全息显微成像系统可以获得白光照明下物体的全息图,对分辨率板成像,能够获得与传统宽场光学显微镜相当的空间分辨率;对 300~500  $\mu\text{m}$  单颗粒金刚石进行全息拍摄,在不同平面实现了数字聚焦。该实验对系统的稳定性要求不高,并且降低了对光源相干性的要求,使物体能够在非相干光照明的条件下记录全息图,推进了数字全息显微术在材料分析、生物学、医学成像等领域的实际应用研究。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.* Imageplane 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.
- 3 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.
- 4 Zhao Hui, Zeng Fanchuang, Zhong Liyun, *et al.* Quantitative measurement of cell phase using dual-wavelength digital holographic microscopy with color CMOS[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070901.  
赵晖,曾凡创,钟丽云,等. 基于彩色 CMOS 双波长数字全息显微术的细胞相位定量测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070901.
- 5 Qin Yi, Zhong Jingang. 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.
- 6 Mertz L, Young N O. Fresnel transformations of images[J]. *SPIE*, 1996, 128: 44-49.
- 7 Rogers G L. Gabor diffraction microscopy the hologram as a generalized zone-plate[J]. *Nature*, 1950, 166(4214): 237.
- 8 Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. *Appl Phys Lett*, 1967, 11(3): 77-79.
- 9 Kim S G. Analysis of effect of phase error sources of polarization components in incoherent triangular holography[J]. *J Opt Soc Korea*, 2012, 16(3): 256-262.
- 10 Kim M K. Full color natural light holographic camera[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9636-9642.
- 11 Li Deyang, Du Yanli, Zhang Wenbin, *et al.* Study of incoherent on-axis digital holography imaging system[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2015, 26(6): 1157-1161.  
李德阳,杜艳丽,张文斌,等. 非相干同轴数字全息成像系统研究[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(6): 1157-1161.
- 12 Wan Yuhong, Man Tianlong, Tao Shiquan. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209004.  
万玉红,满天龙,陶世荃. 非相干全息术成像特性及研究进展[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209004.
- 13 Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 912-914.
- 14 Rosen J, Brooker G. Fluorescence incoherent color holography[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2244-2250.
- 15 Rosen J, Brooker G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy[J]. *Nat Photon*, 2008, 2(3): 190-195.
- 16 Katz B, Rosen J, Kelner R, *et al.* Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM)[J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 9109-9121.

- 17 Bouchal P, Kapitán J, Chmelik R, *et al.* Point spread function and two-point resolution in Fresnel incoherent correlation holography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15603-15620.
- 18 Bouchal P, Bouchal Z. Wide-field common-path incoherent correlation microscopy with a perfect overlapping of interfering beams[J]. *J Eur Opt Soc—Rapid*, 2013, 8: 13011.
- 19 Bouchal P, Bouchal Z. Selective edge enhancement in three-dimensional vortex imaging with incoherent light[J]. *Optics Letters*, 2010, 37(14): 2949-2951.
- 20 Naik D N, Giancarlo P, Osten W. Recording of incoherent-object hologram as complex spatial coherence function using Sagnac radial shearing interferometer and a Pockels cell[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 3990-3995.
- 21 Liu Yingchen, Fan Jinping, Zeng Fanchuang, *et al.* Recording, reconstruction and realization of white-light Fresnel incoherent digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1009002.  
刘英臣, 范金坪, 曾凡创, 等. 白光菲涅耳非相干数字全息记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1009002.
- 22 Liu Yingchen. Recording and reconstruction of Fresnel incoherent digital holography [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2013.  
刘英臣. 菲涅耳非相干数字全息的记录和再现[D]. 广州: 华南师范大学, 2013.
- 23 Lai X, Zhao Y, Lv X, *et al.* Fluorescence holography with improved signal-to-noise ratio by near image plane recording [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2445-2447.
- 24 Qin W, Yang X, Li Y, *et al.* Two-step phase-shifting fluorescence incoherent holographic microscopy[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(6): 060503.
- 25 Shi Xia, Zhu Wufeng, Ma Fengying, *et al.* Experimental study of the incoherent digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1209003.  
石 侠, 朱五凤, 马凤英, 等. 非相干光照明数字全息实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1209003.
- 26 Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(16): 1268-1270.
- 27 Li Junchang, Song Qinghe, Picart Pascal, *et al.* Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209008.  
李俊昌, 宋庆和, Picart Pascal, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209008.