

无衍射特殊光束的产生与三维表征

于湘华 姚保利 雷铭 严绍辉 杨延龙 李润泽 蔡亚楠

Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams

Yu Xiang-Hua Yao Bao-Li Lei Ming Yan Shao-Hui Yang Yan-Long Li Run-Ze Cai Ya-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 244203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.244203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广义双曲正弦-高斯光束经 gyrator 变换性质和暗空心光束产生

Gyrator transform of generalized sinh-Gaussian beam and generation of dark hollow light beam with vortex

物理学报.2014, 63(10): 104210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104210>

光束通量空间分布随机变化的统计分析

Statistical analysis of shot-to-shot variation of laser fluence spatial distribution

物理学报.2014, 63(7): 074204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074204>

多子光束相干发射小目标探测研究

Coherent emitting of multiple sub-beams for small target detection

物理学报.2014, 63(3): 034203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034203>

数字显微全息中记录参数对颗粒测量影响的数值模拟

Influence of recording parameters on particle field measurement by digital holographic microscopy: a numerical investigation

物理学报.2013, 62(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204203>

数字全息周期像的产生机理及在抑制零级衍射上的应用

The production mechanism of image periodicity in digital holography and its application in zero-order noise suppression

物理学报.2013, 62(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094207>

无衍射特殊光束的产生与三维表征*

于湘华 姚保利[†] 雷铭 严绍辉 杨延龙 李润泽 蔡亚楠

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2015年5月16日收到; 2015年8月3日收到修改稿)

无衍射光束(如贝塞尔光束、艾里光束)因具有无衍射、自愈合的特性,在很多领域都有广泛的应用. 本文提出使用纯相位型空间光调制器对光场的复振幅进行调控,从而可以产生多种复杂模式的无衍射光束,如强度可独立调控的多个零阶贝塞尔光束,两个高阶贝塞尔光束干涉生成的花瓣状无衍射光束,具有多个主瓣的加速光束等特殊的无衍射光束. 通过在待测焦场附近放置一个平面反射镜,使其沿光轴快速扫描光场,并由数字相机同步拍摄反射回来的一系列二维光场强度分布信息,可实现对无衍射光束三维光场强度分布的快速测量和表征. 本实验方法和技术可以快速产生各种复杂的特殊光场并获得其精确的三维可视化重建效果,在光学显微、光学俘获、光学微加工等领域有潜在的应用价值.

关键词: 复振幅调控, 无衍射光束, 光场三维重构**PACS:** 42.40.Jv, 42.60.Jf, 42.66.Lc**DOI:** 10.7498/aps.64.244203

1 引言

无衍射光束因具备在很长传播距离内能保持光束形状不变,且能绕过障碍物后重新恢复原来形貌的传播特性而成为现代光学的重要研究内容. 无衍射光束主要分为两大类:一类是以贝塞尔光束^[1]为代表的直线传播无衍射光束,另一类是以艾里光束^[2,3]为代表的加速(自弯曲)无衍射光束. 这些特殊光束被广泛应用在光学微操作^[4-6]、光学显微成像^[7,8]、等离子体通道的产生^[9,10]、激光微加工等^[11,12]领域. 因此如何产生各种特殊的无衍射光束具有重要理论与实际意义. 空间光调制器(spatial light modulator, SLM)因具有动态可编程调控的优点而成为各种特殊光束产生的重要手段^[13-15]. 空间光调制器按照对光场的调制参量不同,分为振幅型、相位型和混合型三种类型. 以前大部分研究工作聚焦在使用空间光调制器单独调控光场的振幅或相位来产生一些特殊光束,由于光场同时具有振幅和相位分布,这种调制单一参量的方法限制了可产生光场的种类和灵活性. 复振幅(同

时包含振幅和相位)调控技术将光场的振幅和相位信息同时编码在一个计算相位全息图(computer-generated hologram, CGH, 或称为Kinoform)中,使用纯相位型空间光调制器可实现光场振幅与相位的同时调控^[16-21]. 因此,它理论上可以产生任意分布的特殊光束. 但受空间光调制器像元尺寸与调制灰度级的限制,该方法通常只能调制产生振幅缓慢变化的光场.

无衍射光束大多应用于光学聚焦和显微成像系统中,对它们的三维强度分布的快速精确测量具有重要意义. 常见测量光场强度分布的方法主要有CCD横截面测量法^[3]、刀边法^[22]、纳米荧光小球扫描法^[23]、荧光CT法^[24]等. CCD横截面测量法和刀边法是二维测量表征方法;纳米荧光小球扫描法和荧光CT法是三维测量表征方法. 纳米荧光小球扫描方法虽具有精度高的优点,但测量耗时长;荧光CT方法实验装置复杂且精度不高. 为了平衡测量精度与测量时间的矛盾, Grier等^[25,26]提出了一种新的三维测量方法. 该方法通过在待测焦场附近放置一个平面反射镜,使其沿光轴快速扫描光场,用相机拍摄焦场经过物镜放大后的一系列二维强

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB921900)和国家自然科学基金(批准号: 81427802, 61275193)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yaobl@opt.ac.cn

度分布,最后通过软件合成,实现对光场的三维测量和表征,具有速度快、精度高的优点.

本文研究的重点是在光学显微系统中产生各种无衍射特殊光束并实现对其三维光场强度分布的快速高精度的测量和重构.我们解决了复振幅调控技术的两个关键问题:器件调制特性的优化与信息编码技术.利用光栅衍射方法对空间光调制器进行伽马校正,优化其调制特性,使计算相位全息图中八位灰度值0—255能线性对应光场的相位延迟 $0-2\pi$.将待调制光场的振幅和相位信息同时编码到一个计算相位全息图中,并加载到纯相位型空间光调制器上调制入射光场,在调制光场的一级衍射分量上恰好得到实验所需的复振幅光场.基于复振幅调控技术,我们实验产生了多种复杂模式的贝塞尔光束:包括能同时产生多个强度独立控制的零阶贝塞尔光束,用两个同向传播具有相反拓扑核(如 ± 6)的高阶贝塞尔光束干涉生成花瓣状的无衍射光束,以及具有多个主瓣的加速光束.这些无衍射特殊光束的产生和快速三维可视化重建,在光学显微、光学俘获、光学微加工等领域有潜在的应用价值.

2 实验方法

特殊光束经常应用于光学聚焦或显微系统中,为了便于应用,特殊光束产生实验需尽量满足两个条件:特殊光束位于显微系统的焦区以方便实

时观测;尽可能高的激光能量利用率.我们设计的无衍射特殊光束的产生与三维测量表征实验光路如图1所示.将计算相位全息图加载到纯相位型空间光调制器(德国Holoeye公司,PLUTO NIR-II)上调制He-Ne激光.如果空间光调制器上加载的计算相位全息图为特殊光束的空间频谱,由透镜L1(焦距100 mm)和L2(焦距75 mm)组成的无焦中继系统将特殊光束的空间频谱中继到物镜(美国Edmund公司,20 \times ,NA0.6)的后焦平面.对于有些无衍射光束,为了保证能量利用率,加载的全息图不是无衍射光束的空间频谱(如利用锥镜相位因子产生零阶贝塞尔光束),则可以通过移动透镜L1,让它与L2组成一个组合透镜,该组合透镜将调制后的光场变换成无衍射光束的空间频谱,并且保证其刚好位于物镜的后焦平面处.空间频谱经过物镜的傅里叶变换作用,在光学显微系统的焦区生成无衍射特殊光束.通过放置在一维电控平移台(德国Physik Instrumente公司,M405)上的反射银镜沿光轴方向快速扫描待测光场,利用CMOS相机(德国Image Source公司,DMK72 AUCO2-F)同步拍摄经过物镜放大后的反射像,获取一系列二维强度分布数据(1280 \times 960像素 \times 300层).使用开源软件MicroManger-1.4.14实现数据采集和电控平台控制的自动化,整个采集过程耗时60 s.然后利用软件ImageJ将获取的数据立方体重构出无衍射光束的三维强度分布.

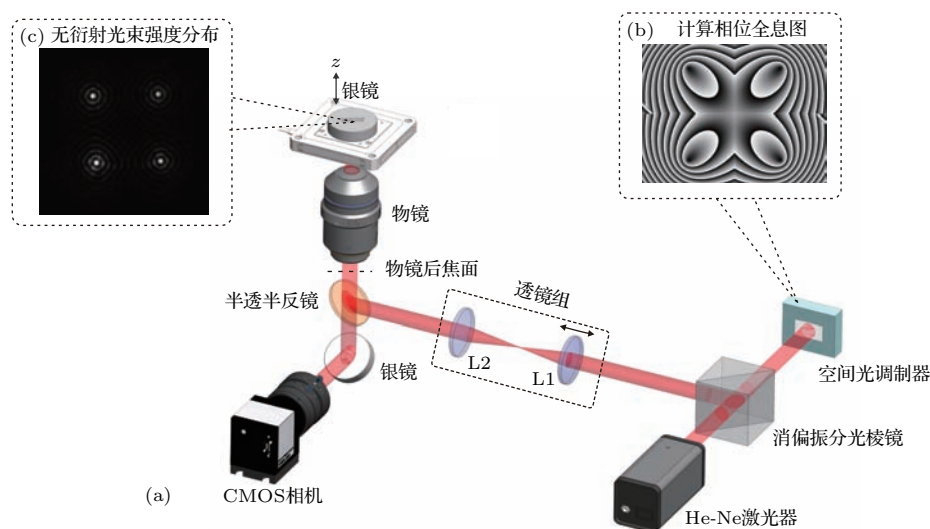


图1 (网刊彩色) 无衍射特殊光束产生与三维测量实验装置 (a) 实验光路; (b) 空间光调制器上加载的计算相位全息图; (c) 物镜焦区附近产生的无衍射光束强度分布图

Fig. 1. (color online) Optical setup for generation and measurement in three-dimension of nondiffracting optical beams: (a) The layout of optical configuration; (b) computer-generated-hologram loaded on the SLM; (c) intensity distribution of nondiffracting optical beams near the focal region of the objective lens.

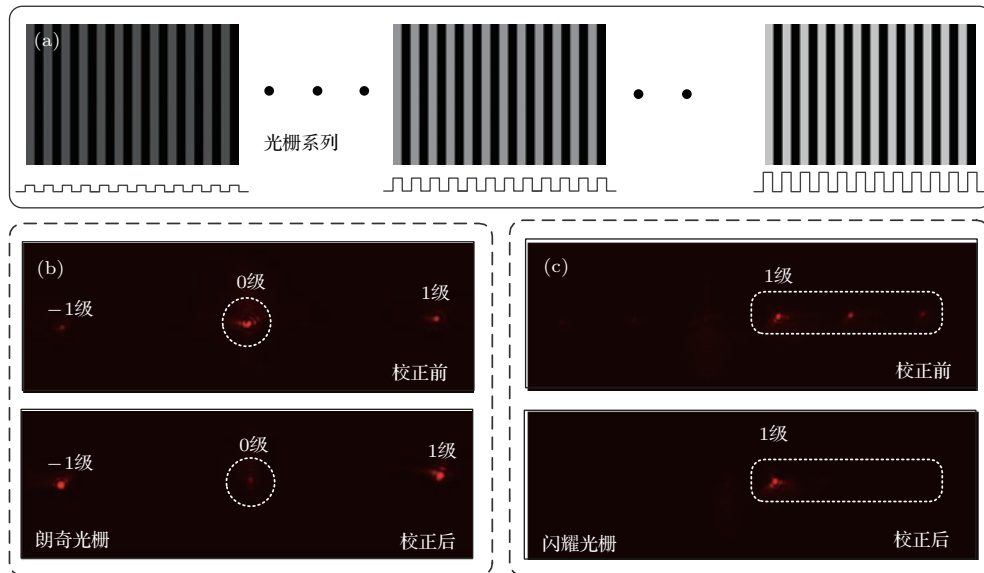


图2 (网刊彩色) 基于光栅衍射法进行空间光调制器伽马校正的实验结果 (a) SLM上加载的一系列灰度值连续变化的二值相位型光栅; (b) 校正前后龙基光栅的衍射结果; (c) 校正前后闪耀光栅的衍射结果

Fig. 2. (color online) Experimental results of gamma correction for the spatial light modulator in the way of variable binary phase gratings: (a) A series of binary gratings with different gray scales (corresponding to different phase depths) loaded on SLM for gamma correction; (b) diffraction patterns of Ronchi gratings before/after gamma correction; (c) diffraction patterns of blazed gratings before/after gamma correction. The experimental results indicate that the phase modulation of SLM is optimized to be linear in the range of $0-2\pi$ after gamma correction.

纯相位型空间光调制器是实验的核心器件, 它的调制特性决定复振幅调控的质量. 在外加电场的驱动下, SLM中的液晶分子取向发生变化引起液晶的有效折射率改变而达到相位延迟目的. 因相位延迟量受激光偏振特性、波长以及照明方式等因素的影响, 故在实验之前需要对SLM进行伽马校正以优化器件本身的调制特性, 使计算全息图中八位灰度值0—255线性对应光场相位延迟0— 2π . 传统的伽马校正方法是基于干涉测量法得出灰度值与相位延迟的关系进行校正, 然而该方法在实际操作过程中需重新搭建干涉光路, 且具有无法对低相干光源如LED校正的缺点. 为此, 我们使用光栅衍射的方法对空间光调制器进行伽马校正^[27]. 该方法通过给空间光调制器加载一系列如图2(a)所示灰度值连续变化的二值相位型光栅, 用CMOS相机拍摄其衍射图案, 并测定光栅的衍射效率来间接得到灰度值与相位延迟的关系. 我们使用Matlab编写的程序实现了伽马校正的自动化. 图2(b)和图2(c)分别展示了伽马校正前后龙基光栅与闪耀光栅的衍射图案. 从图中可以看出, 伽马校正后, 龙基光栅的零级衍射得到了有效抑制, 闪耀光栅的能量主要集中在闪耀一级上而高级衍射几乎可以

忽略不计. 两种光栅衍射结果与理论模型符合得非常好, 表明经过伽马校正后的空间光调制器线性响应且调制深度刚好为 2π .

复振幅调控技术的核心是在一个相位全息图中同时编码振幅与相位信息. 设任意一个待调制光场的复振幅为 $U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp[i\Phi(\mathbf{r})]$, 其中 $A(\mathbf{r})$ 与 $\Phi(\mathbf{r})$ 分别表示振幅和相位随着空间位置 \mathbf{r} 的分布. 将包含振幅和相位分布的复合计算全息图 $H(\mathbf{r}) = M(\mathbf{r}) \cdot \Phi(\mathbf{r})$ (其中 $M(\mathbf{r})$ 通过解方程 $\text{sinc}[1 - M(\mathbf{r})] = A(\mathbf{r})$ 获得)加载到纯相位型空间光调制器上调制平面波入射光场, 调制后入射光场的衍射场为

$$D(\mathbf{r}) = \exp[iM(\mathbf{r}) \cdot \Phi(\mathbf{r})] = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} T_l \exp[il\Phi(\mathbf{r})], \quad (1)$$

其中 T_l 为第 l 级衍射系数. (1)式中的一级衍射分量为 $D_1(\mathbf{r}) = T_1 \exp[i\Phi(\mathbf{r})] = A(\mathbf{r}) \exp[i\Phi(\mathbf{r})]$, 它恰好是实验所需调制的复振幅光场 $U(\mathbf{r})$ ^[16,20]. 虽然纯相位型空间光调制器只能调控入射光场的相位, 但利用 $M(\mathbf{r})$ 因子改变相位 $\Phi(\mathbf{r})$ 的调制深度, 可以达到调控一级衍射光场复振幅的目的, 然后通

过空间滤波技术选取光场的一级衍射分量作为实验光场,即可实现光场相位与振幅的同时调控.相比于传统的单参量调控,复振幅调控技术增加了调制自由度,因而能产生复杂的无衍射光束.

3 结果与讨论

由于贝塞尔光束的空间频谱为一个锐利的圆环,如果用SLM直接产生这个环缝,则光束的能量利用率会大幅降低.而我们知道锥镜可以用来产生零阶贝塞尔光束^[28],因此,我们可以在SLM上加载锥镜相位因子调制光场,调制后光场经过透镜组后变成贝塞尔光束的空间频谱,通过调节透镜组保证它刚好位于物镜的后焦面处,经过物镜傅里叶变换作用在前焦面附近生成贝塞尔光束,这样可以大幅提高激光的能量利用率.利用具有不同

相位调制深度的锥镜相位因子阵列可以产生两个或多个强度可独立调控的零阶贝塞尔光束.加载到空间光调制器上的计算相位全息图为: $CGH = [\Phi_{A1}(r-r_0)+G(r)]+M[\Phi_{A2}(r+r_0)+G(-r)]$. 这里 Φ_{A1} 与 Φ_{A2} 分别表示中心不重合的两个锥镜的相位因子; $G(r)$ 表示闪耀光栅相位,它决定两个零阶贝塞尔光束的夹角.利用 M 改变 Φ_{A2} 的相对相位调制深度来改变两个零阶贝塞尔光束的相对峰值强度. CGH 计算结果如图 3(a) 所示,图 3(b)—(f) 为 CMOS 相机拍摄的当 M 分别取 1.61, 1.35, 1, 0.74, 0.62 情况下,双贝塞尔光束在焦平面的强度分布,曲线表示零阶贝塞尔光束强度分布曲线,数字表示两个贝塞尔光束的峰值强度比.实验结果表明,利用复振幅调控的方法能够同时产生不同强度比的零阶贝塞尔光束.

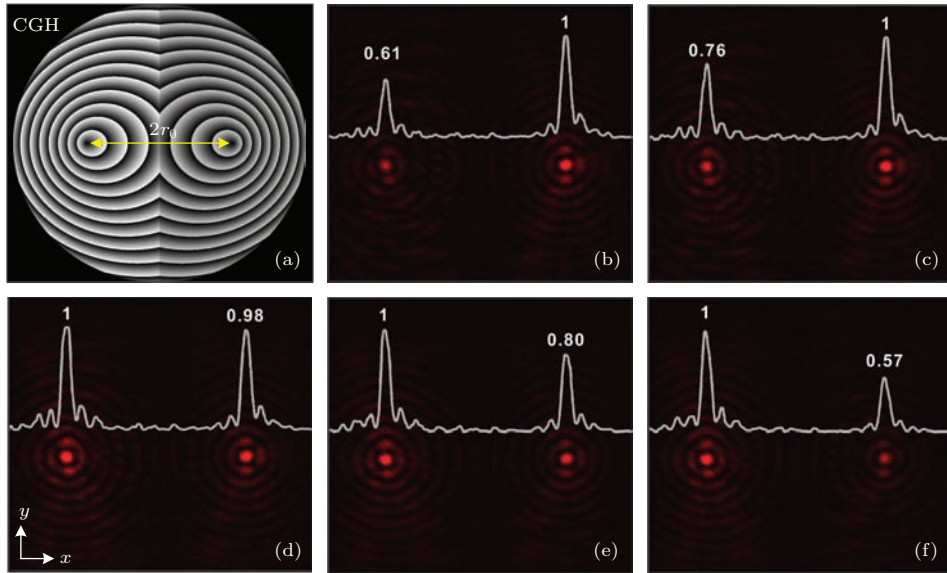


图3 (网刊彩色)同时产生两个强度可独立调控的零阶贝塞尔光束实验结果 (a)计算全息图;(b)—(f)不同强度比的零阶贝塞尔光束在焦平面的强度分布实验结果,曲线为归一化强度分布

Fig. 3. (color online) Experimental results of two zero-order Bessel beams with controllable intensity distributions: (a) Computer-generated-hologram loaded on SLM; (b)–(f) intensity distributions of two Bessel beams with different peaks ratios. Inset curves are normalized intensity distributions.

除了同时产生两个贝塞尔光束,复振幅调控技术还能产生更复杂模式的贝塞尔光束.图 4(a)是同时产生四个零阶贝塞尔光束的实验结果;图 4(c)是基于复振幅调控技术产生的花瓣状无衍射光束的二维强度分布实验结果,它是由两个同向传播且具有相反拓扑核的 ± 6 阶贝塞尔光束干涉实现,即 $U(\mathbf{r}) = J_6(\mathbf{r}) + J_{-6}(\mathbf{r})$, 其中 $J_{\pm l}(\mathbf{r})$ 表示第一类 $\pm l$

阶贝塞尔函数.图 4(b)和图 4(d)分别是与图 4(a)和图 4(c)对应的无衍射光束的三维强度分布测量重构结果.实验结果表明,基于复振幅调控产生的复杂模式贝塞尔光束都具有无衍射的特性.与传统的零阶贝塞尔光束相比,复杂模式的贝塞尔光束在光学微加工、光学俘获、光学显微等领域具有更多和特殊的应用.

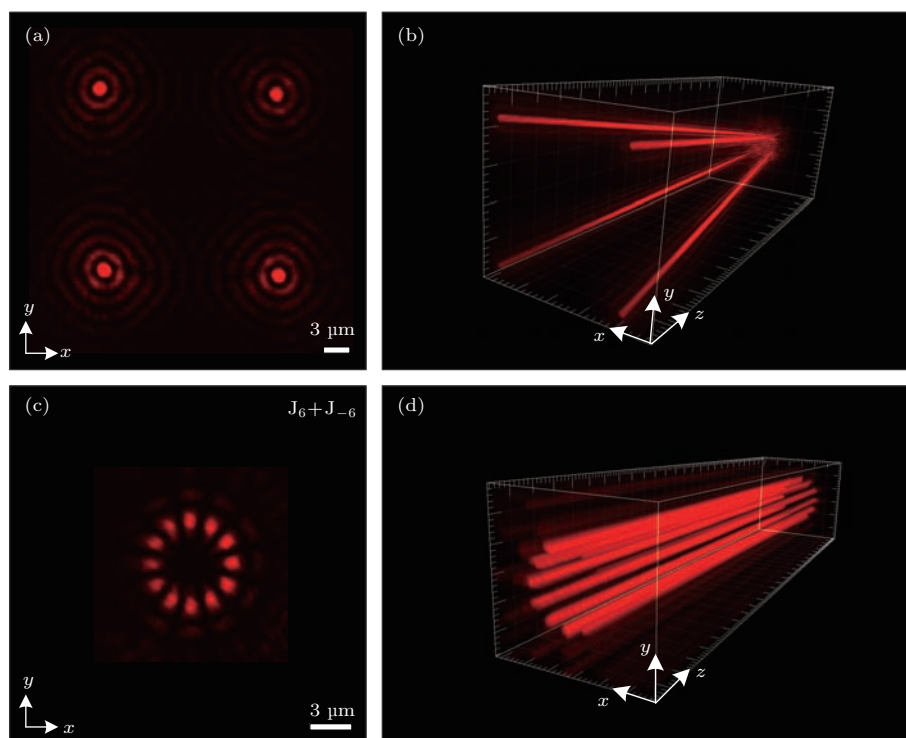


图4 (网刊彩色) 复杂模式贝塞尔光束产生和测量实验结果 (a) 同时产生四个零阶贝塞尔光束的焦区横截面强度分布; (b) 同时产生四个零阶贝塞尔光束的强度分布三维测量重构结果; (c) 同向传播的 ± 6 阶贝塞尔光束干涉形成的花瓣状无衍射光束的焦区横截面强度分布; (d) 花瓣状无衍射光束的强度分布三维测量重构结果; 标尺: $3 \mu\text{m}$

Fig. 4. (color online) Experimental results of generation and measurement of complex-mode Bessel beams: (a) Transversal intensity distribution of four zero-order Bessel beams in the focal region of objective; (b) 3D reconstruction of the measured four zero-order Bessel beams; (c) transversal intensity distribution of non-diffracting petal-like beams generated by interference of two coaxial propagation of ± 6 orders Bessel beams in the focal region of objective; (d) 3D reconstruction of the measured nondiffracting petal-like beams. Scale bar: $3 \mu\text{m}$.

以艾里光束为代表的加速(自弯曲)光束是另一类非常重要的无衍射光束. 普通的艾里光束仅有一个主瓣沿着抛物线轨迹传播^[2,3]. 具有任意加速轨迹^[29]或同时产生多个主瓣的加速光束^[30,31]成为该领域的重要研究方向. 普通艾里光束的空间频谱为如图5(a)所示的三次相位因子, 我们修正艾里光束的空间频谱能产生具有多个主瓣的加速光束, 它的空间频谱解析式为

$$f(k_x, k_y) = \text{sign}(k_x - k_y) \exp[ia(k_x^3 + k_y^3)], \quad (2)$$

这里 (k_x, k_y) 为归一化空间频谱分量, sign 为符号函数, 常数参量 a 决定加速光束主瓣的物理尺寸. 由于给普通的艾里光束的空间频谱增加了 $\text{sign}(k_x - k_y)$ 分量, 导致其部分空间频谱出现 π 相移, 如图5(d)所示, 因而能产生如图5(e)所示的具有两个主瓣的加速光束. 图5(c)和图5(f)分别为普通的艾里光束和双主瓣加速光束三维强度测量重构结果. 实验表明, 该双主瓣加速光束的两个

主瓣具有相同的能量, 它的加速轨迹与普通艾里光束类似, 也为抛物线. 我们对双主瓣加速光束的自愈合特性进行了实验验证. 图6(a)—(c)表示在无障碍物阻挡情况下, 双主瓣加速光束在不同轴向位置处($z = 0, 24, 48, 72 \mu\text{m}$)的强度分布图; 图6(e)—(f)表示单个主瓣被阻挡时的自愈合实验结果; 图6(i)—(l)表示双主瓣同时被阻挡时的自愈合结果. 实验结果表明, 无论是在单主瓣还是双主瓣被阻挡的情况下, 加速光束在传播约 $72 \mu\text{m}$ 后都能很好地恢复原来的形貌. 除了双主瓣加速光束, 通过修正 sign 函数还能进一步产生具有两个以上主瓣的加速光束. 与普通的艾里光束相比, 双主瓣加速光束为一次加工制备两个相距特别近的弯曲微流管提供了可能. 而与所谓的球加速光束相比^[30,31], 本文产生的多主瓣加速光束具有非常高的能量利用率, 它们在飞秒微加工和光学俘获领域更具有实用意义.

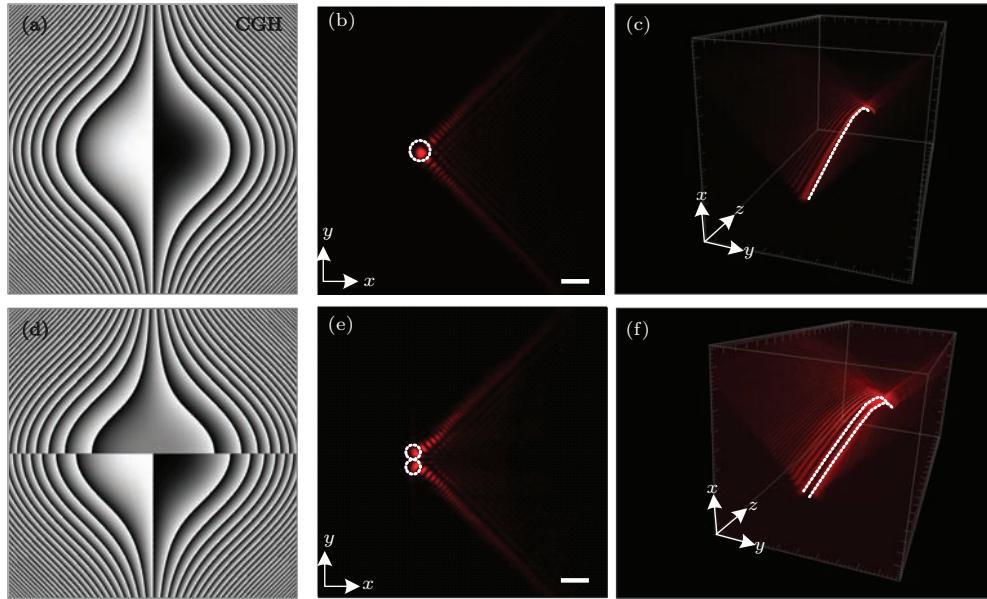


图5 (网刊彩色) 加速光束产生和测量实验结果 (a) 加载到空间光调制器上产生普通艾里光束的计算全息图; (b) 艾里光束横截面的强度分布; (c) 艾里光束强度分布三维测量重构结果; (d) 产生双主瓣加速光束的计算全息图; (e) 双主瓣加速光束横截面的强度分布; (f) 双主瓣加速光束的强度分布三维测量重构结果; 标尺: $5\ \mu\text{m}$

Fig. 5. (color online) Experimental results of generation and measurement of accelerating beams: (a) Computer-generated-hologram loaded on SLM for the conventional Airy beam; (b) transversal intensity distribution of the conventional Airy beam; (c) 3D reconstruction of the measured Airy beam; (d) computer-generated-hologram for two-main-lobe accelerating beam; (e) transversal intensity distribution of the two-main-lobe accelerating beam; (f) 3D reconstruction of the measured two-main-lobe accelerating beam. Scale bar: $5\ \mu\text{m}$.

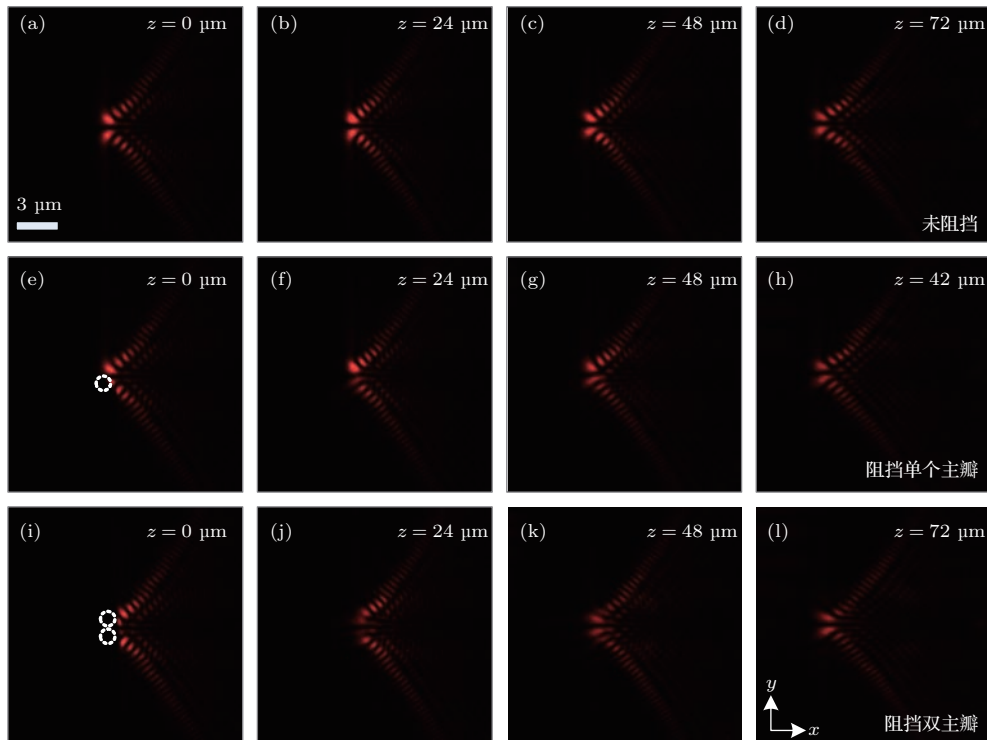


图6 (网刊彩色) 双主瓣加速光束自愈合实验 (a)–(d) 无障碍物阻挡情况下双主瓣加速光束在不同轴向位置处的横截面强度分布; (e)–(h) 阻挡单个主瓣时的实验结果; (i)–(l) 两个主瓣同时被阻挡时的实验结果; 标尺: $3\ \mu\text{m}$

Fig. 6. (color online) Experimental results of self-healing property of the two-main-lobe accelerating beam: (a)–(d) Transversal intensity distributions of the two-main-lobe accelerating beam in different axial positions without any obstacles; (e)–(h) transversal intensity distributions of the two-main-lobe accelerating beam with one main lobe blocked; (i)–(l) transversal intensity distribution of the two-main-lobe accelerating beam with both of main lobes blocked. Scale bar: $3\ \mu\text{m}$.

4 结 论

基于光场的复振幅调制技术, 实验产生了两个能量可独立调控的无衍射贝塞尔光束, 用两个同向传播贝塞尔光束的干涉产生了花瓣状无衍射光束, 还产生了新型双主瓣的加速光束. 利用反射镜沿光轴方向快速扫描光场, 并由数字相机同步拍摄反射回来的一系列二维光场强度分布信息, 实现了对无衍射光束三维光场强度分布的快速测量和表征. 精确快速地获取特殊光束的三维强度分布, 对理论和应用具有重要的指导意义. 利用本实验方法和技术可以快速产生各种复杂的特殊光场并获得其三维可视化重建效果, 在光学显微、光学俘获、光学微加工等领域具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Durnin J, Miceli J, Eberly H 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1499
- [2] Siviloglou G A, Christodoulides D N 2007 *Opt. Lett.* **32** 979
- [3] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, Christodoulides D N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 213901
- [4] Grier D G 2003 *Nature* **424** 810
- [5] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K 2008 *Nat. Photon.* **2** 675
- [6] Ran L L, Guo Z Y, Qu S L 2012 *Chin. Phys. B* **21** 104206
- [7] Zhao M, Zhang H, Li Y, Ashok A, Liang R, Zhou W, Peng L 2014 *Biomed. Opt. Express* **5** 1296
- [8] Jia S, Vaughan J C, Zhuang X 2014 *Nat. Photon.* **8** 302
- [9] Faccio D, Rubino E, Lotti A, Couairon A, Dubietis A, Tamosauskas G, Papazoglou D G, Tzortzakis S 2012 *Phys. Rev. A* **85** 033829
- [10] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, Siviloglou G A, Christodoulides D N 2009 *Science* **324** 229
- [11] Yu X, Yao B, Lei M, Hampp N, Liang Y, Dan D, Yang Y, Yan S, Gao P, Ye T 2014 *Appl. Phys. B* **115** 365
- [12] Mathis A, Courvoisier F, Froehly L, Furfaro L, Jacquot M, Lacourt P A, Dudley J M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 071110
- [13] Chattrapiban N, Rogers E A, Cofield D, Hill T W, Roy R 2003 *Opt. Lett.* **28** 2183
- [14] Zhang P, Hu Y, Li T, Cannan D, Yin X, Morandotti R, Chen Z, Zhang X 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 193901
- [15] Yu X H, Yao B L, Li X Y, Liu S L, Lei M, Li R Z, Liang Y S, Zhou X, Wu D, Dan D, Min J W, Yan S H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024218 (in Chinese) [于湘华, 姚保利, 李新宇, 刘石磊, 雷铭, 李润泽, 梁言生, 周兴, 吴迪, 但旦, 闵俊伟, 严绍辉 2015 物理学报 **64** 024218]
- [16] Davis J A, Cottrell D M, Campos J, Yzuel M J, Moreno I 1999 *Appl. Opt.* **38** 5004
- [17] Arrizon V, Ruiz U, Carrada R, Gonzalez L A 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 3500
- [18] Zhu L, Wang J 2014 *Sci. Rep.* **4** 7441
- [19] Theisen M J, Head S T, Brown T G, Cillmer S R, Ellis J D 2014 *Proc. SPIE* **8949** 8949x
- [20] Ando T, Ohtake Y, Matsumoto N, Inoue T, Fukuchi N 2009 *Opt. Lett.* **34** 34
- [21] Han W, Yang Y, Cheng W, Zhan Q 2013 *Opt. Express* **21** 20692
- [22] Suzuki Y, Tachibana A 1975 *Appl. Opt.* **14** 2809
- [23] Bauer T, Orlov S, Peschel U, Banzer P, Leuchs G 2014 *Nat. Photon.* **8** 23
- [24] Radwell N, Boukhet M A, Franke-Arnold S 2013 *Opt. Express* **21** 22215
- [25] Roichman Y, Cholis I, Grier D G 2006 *Opt. Express* **14** 10907
- [26] Shanblatt E R, Grier D G 2011 *Opt. Express* **19** 5833
- [27] Engstrom D, Persson M, Bengtsson J, Goksor M 2013 *Opt. Express* **21** 16086
- [28] Lei M, Yao B, Rupp R A 2006 *Opt. Express* **14** 5803
- [29] Yan S, Li M, Yao B, Yu X, Lei M, Dan D, Yang Y, Min J, Peng T 2015 *Phys. Lett. A* **379** 983
- [30] Aleahmad P, Miri M A, Mills M S, Kaminer I 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 203902
- [31] Alonso M A, Bandres M A 2012 *Opt. Lett.* **37** 5175

Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams*

Yu Xiang-Hua Yao Bao-Li[†] Lei Ming Yan Shao-Hui Yang Yan-Long
Li Run-Ze Cai Ya-Nan

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 16 May 2015; revised manuscript received 3 August 2015)

Abstract

Nondiffracting optical beams play an important role in contemporary optics due to their special propagation characteristics, i.e., nondiffracting in a diffraction-free zone, shape recovering behind obstacles or self-healing property. Liquid crystal spatial light modulators (LC-SLM) are widely used for generating nondiffracting optical beams in virtue of programmable and dynamic features. In this paper, we propose a complex amplitude modulation technique that can encode any scalar complex fields for generating the complex nondiffracting beams. Before experiment, the phase modulation curve of the phase-only LC-SLM is optimized into being linear in a range of $0-2\pi$ by gamma correction in the way of variable binary phase gratings. Then, we experimentally generate the nonaccelerating beams, e.g., two zero-order Bessel beams with variable intensity distributions, and the nondiffracting petal-like beams generated by interfering with two coaxial Bessel beams. By scanning a reflection mirror near the focal region along the optical axis, a stack of two-dimensional images is acquired, and then a three-dimensional intensity profile of the beam is reconstructed with a software. We also experimentally demonstrate a new kind of multi-main-lobe accelerating beam with parabolic accelerating trajectory by modifying the spatial spectrum of classical Airy beam. Compared with the so-called vectorial accelerating beam with multiple main lobes in spheroidal coordinates, our generated two-main-lobe accelerating beam has a very high energy efficiency. The self-healing property of the two-main-lobe accelerating beam is also demonstrated. The presented technique can generate a variety of complex nondiffracting optical beams rapidly and obtain their three-dimensional intensity distributions accurately, which has potential applications in the fields of optical microscope, optical data storage, optical trapping, optical micromachining, etc.

Keywords: modulation of complex amplitude, nondiffracting optical beams, 3D reconstruction of optical beams

PACS: 42.40.Jv, 42.60.Jf, 42.66.Lc

DOI: 10.7498/aps.64.244203

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921900) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 81427802, 61275193).

[†] Corresponding author. E-mail: yaobl@opt.ac.cn