

基于空间光场调控技术的光学微操纵

梁言生 姚保利* 雷 铭 严绍辉 于湘华 李曼曼

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, 陕西 西安 710119

摘要 光镊技术具有无机械接触与高精度操纵微小尺度粒子的优点,自发明以来已逐渐成为生命科学和胶体物理学等领域中强有力的研究工具。随着研究的深入,传统的单光阱光镊已难以满足更高级的应用需求。近年来,空间光场调控技术通过对光场的振幅、相位和偏振态分布的调制,极大地丰富和增强了光学微操纵技术的功能,促进了包括激光微纳加工、微粒分选与输运、胶体粒子物理特性研究等方面的发展。从光场的振幅、相位和偏振态调制技术出发,综述近年来空间光场调控技术的发展及其在光学微操纵中的应用,重点介绍全息光镊、特殊模式光束微操纵、矢量光场微操纵等光学微操纵技术的研究进展。

关键词 全息; 光学微操纵; 光学捕获; 空间光场调控; 全息光镊; 特殊模式光束; 矢量光束

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1026003

Optical Micro-Manipulation Based on Spatial Modulation of Optical Fields

Liang Yansheng Yao Baoli Lei Ming Yan Shaohui Yu Xianghua Li Manman
*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

Abstract Optical tweezers has become a powerful tool for research in life science and colloidal physics since its invention due to its advantages of mechanical contact-free and high-precision manipulation of micro-sized particles. However, the conventional single-trap optical tweezers is limited in the increasing demands of research. In recent years, the technique of spatial modulation of optical fields, which modulates the amplitude, phase and polarization state of light, has extensively enhanced the function of optical micro-manipulation, and promoted the advance in laser micro/nano fabrication, optical sorting and transportation of micro-particles, and colloidal particles studies. The advance in spatial modulation of optical fields to date and their applications in optical micro-manipulation is reviewed, including the holographic optical tweezers, special-mode optical beams manipulation, and vector beams manipulation.

Key words holography; optical micro-manipulation; optical trapping; spatial modulation of optical fields; holographic optical tweezers; special-mode beams; vector beams

OCIS codes 090.1760; 350.4855; 140.3300

1 引 言

在光与物质相互作用过程中,既存在光子能量的传递,也伴随着光子动量和角动量的转移。光子动量和角动量的交换会发生力学作用,但是这种作用力极其微弱。激光的诞生使得光的力学效应在微观领域可以被直接观察。1970年,美国科学家 Ashkin^[1]利用两束相向传播的聚焦激光束成功束缚住了在水里的电介质微粒,证明了激光对微粒的散射力作用。1986年,Ashkin及其合作者利用单束强聚焦的激光实现了对水中电介质微粒的稳定捕获,标志着光镊技术的诞生^[2]。光镊技术具有无机械接触、操控精度高和可测量皮牛

收稿日期: 2016-07-11; **收到修改稿日期:** 2016-08-19

基金项目: 国家重大科学研究计划(2012CB921900)、国家自然科学基金(61377008,61275193,11474352)

作者简介: 梁言生(1987—),男,博士研究生,主要从事光学微操纵技术研究。E-mail: liangyansheng@opt.cn

导师简介: 姚保利(1968—),男,博士,研究员,主要从事光学微操纵技术、超分辨显微成像和数字全息显微方面的研究。

E-mail: yaobl@opt.ac.cn(通信联系人)

量级微作用力等优点^[3],广泛应用于从原子大小到数百微米量级尺度粒子的操纵,其应用领域包括生物医学^[4-5]、胶体物理^[6-7]和原子物理^[8-9]等。

经过三十多年的发展,光镊技术取得了许多重要进展。早期的光镊技术只能产生一个光阱,操纵功能非常有限^[2]。因此,从单光阱捕获向多光阱捕获是光镊技术发展的必然趋势^[10-11]。将多个激光器输出的光束耦合到同一个聚焦物镜是产生多光阱的最直接方法,但是这种方法产生的光阱数目有限,且装置复杂。利用多光束干涉技术和时分复用技术虽然可以提高光阱数量,但是都存在一些缺陷,例如利用多光束干涉产生的光阱阵列结构比较固定,无法实现实时动态操纵^[10];而通过光束偏转器如声光调制器、机械式扫描振镜等器件来扫描入射光束而产生的时间上的多光阱,只能静态捕获多个微粒或者是动态操纵少数几个微粒^[11],同时,受光束偏转器扫描频率和光束偏转角所限,这种技术无法产生大阵列光阱。相比于上述多光阱光镊技术,通过衍射元件调制光束相位来产生特定目标光场的全息光镊(HOT)技术可产生大阵列光阱,而且具有实时、动态、三维空间独立控制多微粒等优点。1998年,Dufresne等^[12]利用一个固定衍射元件产生了大阵列光阱分布,标志着全息光镊技术的诞生。2001、2002年,他们利用液晶空间光调制器(SLM)调制入射光场的相位产生二维或三维光阱阵列,实现了实时、动态、三维独立操控多个微粒的功能,是全息光镊技术发展中一项具有重要意义的研究成果^[13-14]。

从传统的微粒捕获与动态操纵到功能更为丰富的微粒旋转、分选和运输,是光学微操纵技术的新的方向发展。传统单光阱光镊技术利用的是光场强度梯度力来实现对微粒的三维束缚,通过改变光阱位置来实现对微粒的移动,因此这种光镊也叫梯度光镊(GOT)。实际上,光作为一种矢量波,不仅具有振幅参量,还具有相位和偏振参量。微粒在光场中的受力与光场的强度(即振幅的平方)^[2]、相位^[15]和偏振态^[16-17]均密切相关。通过控制聚焦光场的相位分布可以实现功能更为丰富的光学微操纵,如利用具有相位梯度的光阱可以驱动微粒沿特定轨迹运动。一些特殊模式光束如拉盖尔-高斯光束、高阶贝塞尔光束,由于具有螺旋相位分布,可以对微粒进行轨道旋转操作,进一步运输与分选微粒^[18-19]。除了振幅和相位分布外,偏振也是光学微操纵技术可调制的另一个重要因素,特别是在强聚焦条件下。例如,径向偏振光在强聚焦下具有很强的轴向电场分量和更锐利的焦斑^[20],因此具有比线偏振光和圆偏振光更高的轴向捕获效率,可以捕获金属微粒或者纳米颗粒^[21-22]。

综上所述,光场的振幅、相位和偏振态的调控对于光学微操纵技术具有重要的意义。基于光场的这三个空间物理量,本文综述空间光场调控技术,包括光场的相位调制、复振幅调制和偏振态调制技术,及其在光学微操纵中的应用研究进展,重点论述全息光镊、特殊模式光束微操纵和矢量光场微操纵技术,希望对国内从事光学微操纵技术及其相关应用研究的人员提供一定的参考。

2 空间光场调控技术

基模高斯光束是绝大多数激光器的典型输出模式,也是大量激光应用的基础。然而,随着应用的不断扩展,单纯的基模高斯光束已难满足需要。空间光场调控技术,即通过调制光场的振幅、相位和/或偏振态空间分布,将传统的基模高斯光束转换为新颖的空间结构光场,已广泛应用于光信息存储^[23-24]、光学微纳加工^[25]、光通信^[26]、光学显微^[27]和光学微操纵^[13-14]等领域,是许多应用的核心技术。利用相位掩模板、特定折射率分布的光纤等器件虽然可以产生特殊模式的光场,如阵列光阱、涡旋光束等,但是产生的光场模式固定。而利用动态空间光场调控器件则可以实现任意的光场调控。常见的动态空间光场调控器件主要有数字微镜阵列器件(DMD)、变形镜(DM)、液晶 SLM 等。DMD 是强度型调制器件,具有刷新速度快、光能量利用率高、损伤阈值高等优点,但不能对入射光的相位进行调制。变形镜是波前调制器件,其像元数目比较少(几十到几百个),对入射光的相位调制深度比较小。液晶 SLM 既有强度型也有相位型,相位型液晶 SLM 具有光能量利用率高和相位调制深度大的优点,因而成为目前的主流器件。下面主要介绍基于相位型调制器件(特别是相位型液晶 SLM)的空间光场调控技术,包括对入射光场的相位调制、复振幅调制和偏振态调制。

2.1 相位调制

具有特定强度分布的光场,无论是在光学微操纵、激光刻写,还是生物的光刺激与光分解^[28]等领域都有着重要的应用。这种具有特定强度的目标光场可以通过直接调制入射光的振幅得到,也可以通过调制入射

光的相位来产生。入射光的相位调制可以通过相位型 SLM 加载计算全息图 (CGH) 来实现, 然后利用傅里叶变换原理产生具有特定强度的目标光场, 这种技术称为全息光场整形^[13-14,29], 其基本原理如图 1 所示。衍射光学元件所在平面 (全息面) 与期望光场分布面 (再现面) 分别位于傅里叶透镜的前后焦面, 输入光场与期望光场之间满足傅里叶变换关系。在给定期望光场强度分布的前提下, 如何确定全息面上的相位分布 (即加载到相位型 SLM 上的 CGH), 从而将入射光场转换为期望的光场强度分布是全息光场调控的关键。常用的 CGH 算法分为直接算法和迭代算法, 其中直接算法包括随机掩模板编码法^[30]、直接搜索法^[31]、光栅透镜相位叠加法^[29]等; 迭代算法包括 Gerchberg-Saxton (GS) 算法^[32]、Generalized Adaptive Additive (GAA) 算法^[29]、遗传算法^[33]等。直接算法可以快速生成任意位置的点光斑, 但是存在均匀性差和鬼影光斑等缺点。迭代算法速度较慢, 但是精度和效率高, 均匀性好。随着阵列光斑数目的增加, 直接算法速度会大大降低, 光场越复杂, 直接法性能越低, 而迭代算法则基本不变。因此对于复杂的目标场, 迭代算法是更好的选择。关于 CGH 算法国内也开展了不少研究, 如孙晴等^[34]研究了利用衍射元件产生阵列光镊的算法设计, 徐淑武等^[35]理论模拟了通过组合相位光栅产生三维阵列光镊的情况。

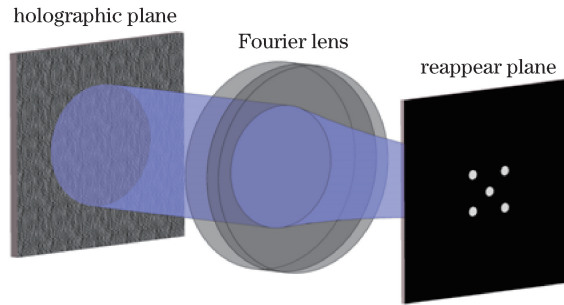


图 1 全息光场整形原理

Fig. 1 Principal of holographic beam shaping

2.2 复振幅调制

光场的相位分布在光学微操纵中也扮演着重要的角色, 由相位梯度引起的作用力可以驱动微粒运动^[15]。在上面所述的基于直接算法和迭代算法的光场相位调制中, 由于只对入射光的相位进行调制, 因此只能确定目标光场的强度分布而不能确定其相位分布。例如在利用迭代算法计算 CGH 的过程中, 每次迭代得到的目标光场的振幅被更新, 但目标光场的相位始终是随机的。如果要对目标光场的振幅和相位分布同时调制, 则要对入射光场的振幅与相位同时调制, 即复振幅调制。第一种方法是利用两个级联的 SLM 来实现复振幅调制, 这两个 SLM 位于 4f 系统的前后焦面上, 如图 2 所示^[36]。这种方法的具体原理是: 设平行入射均匀线偏振光的振幅为 A_0 , 偏振方向为 $(\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y)/\sqrt{2}$, 其中 \mathbf{e}_x 和 \mathbf{e}_y 分别表示水平方向和垂直方向单位矢量。SLM1 对入射光的水平分量进行相位为 φ_1 的调制, 光场分布变为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} A_0 [\exp(i\varphi_1) \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y]. \quad (1)$$

设偏振片 Pol2 的偏振轴方向为 $(\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y)/\sqrt{2}$, 光场分布经过偏振片 Pol2 后变为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} A_0 [\exp(i\varphi_1) + 1] (\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y). \quad (2)$$

利用半波片 HWP2 将光场偏振态旋转为水平方向, 然后经 SLM2 调制, 调制相位为 φ_2 , 则光场变为

$$\mathbf{E} = A_0 \cos\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) e^{i\left(\frac{\varphi_1 + 2\varphi_2}{2}\right)} \mathbf{e}_x. \quad (3)$$

由(3)式可以看出, 最后得到的光场振幅由 $A_0 \cos(\varphi_1/2)$ 控制, 相位由 $(\varphi_1 + 2\varphi_2)/2$ 决定。

另一种方法是使用单个相位型 SLM 进行复振幅调制, 这是目前光场调控技术研究的一个热点, 因为单个 SLM 装置可以大大降低系统成本与复杂性。利用单个 SLM 调制光场复振幅的常用方法包括超像素法^[37-38]和复编码法^[39-40]。超像素法是将相邻两个或多个像素看作一个像素, 这样一个像素可以提供多个自由度来同时调制光场振幅和相位。超像素法调制光场复振幅具有衍射效率高的优点, 但是像素的合并会降

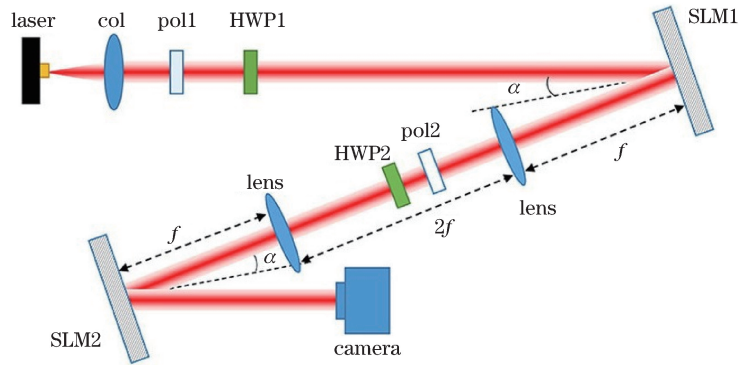


图 2 双 SLM 调制光场复振幅的光路图^[37]

Fig. 2 Schematic of complex-amplitude beam shaping with two SLMs^[37]

低光场的调制精度。复编码法则是采用特定的复编码算法将待产生的光场振幅和相位信息同时编码在一个相位全息图来实现近似的复振幅调制。常用的复编码算法包括 Davis 算法^[39]和 Arrizon 算法^[40]。复编码法是通过调制光场的一阶衍射分量来实现光场的复振幅调制,虽然调制精度较高,但是衍射效率比较低。此外,Wu 等^[41]通过给目标光场设定限制区域,然后利用 GS 迭代算法也实现了光场的近似复振幅调制,但是对于比较复杂的光场,这种迭代方法的精度较低。

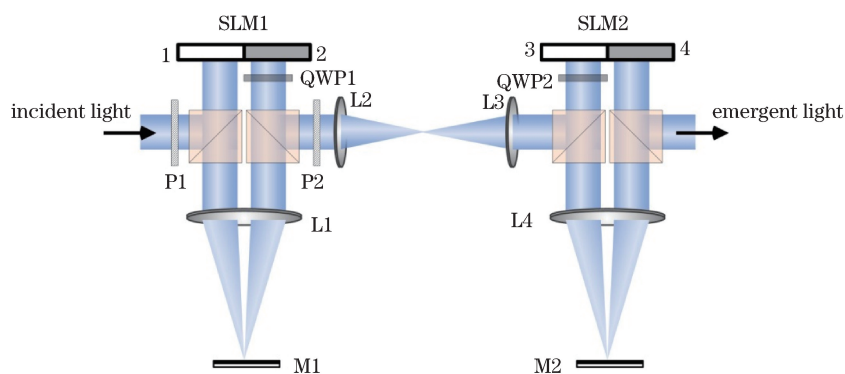
2.3 偏振态调制

偏振态的控制在许多领域中有着重要的应用,特别是在光与物质的相互作用研究中。例如,径向偏振光束在光学微操纵中可以提高对微粒的轴向捕获效率^[21],方位角偏振光可以作为受激发射损耗(STED)荧光显微术中的损耗光源来抑制荧光的发射^[42]。通过控制入射光场的偏振态空间分布可以调制其焦场分布,特别是在强聚焦条件下。常用的柱矢量光束,其柱对称的偏振态分布可以通过叠加一对正交偏振态来实现。例如,在圆偏振基矢下,偏振态矢量有如下分解:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\mathbf{e}_R \exp(i\varphi_R) + \mathbf{e}_L \exp(i\varphi_L)] / \sqrt{2}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ 是光场在 \mathbf{x} 处的偏振态, \mathbf{e} 和 φ 分别是圆偏振光偏振态和相位分布,下标 R 和 L 分别表示右旋和左旋圆偏振光。空间任意一点的偏振方向由这两束光的相位差 $\varphi_R - \varphi_L$ 决定^[43]。利用 SLM 调制产生柱矢量光场的常用方式是将一个 SLM 分割成两个区域^[44]或者是利用两个 SLM^[45],分别调制分束后的两束光的偏振态。通过半波片控制入射光的偏振态,可以使两个 SLM 分别调制入射光的两个正交偏振分量,最后通过四分之一波片将其转换为圆偏振光,然后通过叠加得到预期的矢量光场^[45]。由于偏振态的调制是通过两束圆偏振光的干涉叠加实现的,人们提出了多种干涉装置来实现这一目的,如 Liu 等^[46]提出的萨尼亚克干涉装置和 Chen 等^[47]提出的一般共路干涉装置等。利用共路干涉装置调制光场的偏振态具有更好的稳定性。柱矢量光束也可以用其他方法产生,如使用特定的谐振腔元件使种子激光在柱矢量偏振模式下振荡^[48],使用具有特殊结构的光学元件^[49]或者使用特定折射率分布的光纤^[50]等。这些方法各有优缺点,具体根据实际应用需要而选择。

由于光阱中微粒受力与光场的振幅、相位和偏振态分布息息相关,所以对光场的这三个参量同时调制对于光学微操纵更有意义。一般需要四个调制自由度,两个用于调制振幅和相位,另外两个调制偏振态,因此通常需要使用四个 SLM 或者两个双通的 SLM。偏振态的调制一般需要两个自由度,如通过叠加一对正交偏振态分量来产生矢量光场。如果在 SLM 的前后引入一对快轴方向分别沿 45° 和 135° 方向的四分之一波片,则 SLM 和这两个四分之一波片可以作为一个偏振旋转器,偏振态的旋转角度由 SLM 所加载的 CGH 相位来控制,从而可以减少偏振态调制的一个自由度。图 3 是利用两个双通的 SLM 实现光场三个参量同时调制的光路示意图^[51],其中 M1、M2 是反射镜,偏振片 P1 和 P2 的偏振轴均沿水平方向,两个四分之一波片 QWP1 和 QWP2 的快轴方向与水平方向成 45° ,SLM1 和 SLM2 分别分成左右两个区域,其中区域 1 调制光场相位,区域 2 结合 QWP1 和 P2 调制光场振幅,区域 3 调制光场偏振态,区域 4 用于补偿区域 2 和 3 在调制光场振幅和偏振态时对光场引入的额外相位。

图 3 利用两个双通的 SLM 调制产生具有任意复振幅矢量光场的原理图^[51]Fig. 3 Schematic of generating arbitrary complex vector beams with two-double-pass-SLMs setup^[51]

3 基于空间光场调控技术的光学微操纵

利用空间光场调控技术产生的具有特定强度、相位和偏振态分布的光场极大地丰富了光学微操纵技术手段,为生命科学、基础物理等领域研究提供了强有力的工具。下面从全息光镊、特殊模式光束微操纵和矢量光场微操纵三个方面介绍近年来的主要进展。

3.1 全息光镊

全息光镊是光学微操纵技术研究中的一大热点,其应用广泛,包括微纳加工、DNA 拉伸、胶体粒子特性研究等。国内外众多研究小组都开展了大量的研究并取得了丰硕的成果。其中国内目前从事全息光镊研究的研究组包括中国科学技术大学的李银妹课题组^[34]和李静课题组^[52],深圳大学的袁小聪课题组^[53],南京大学的丁剑平课题组^[54],中国科学院西安光学精密机械研究所的姚保利课题组^[55]等。相比于传统的单光阱光镊,基于可编程控制 SLM 的全息光镊具有多微粒实时、动态、三维空间独立操控的优点^[13-14, 55]。通过调制激光束相位分布,把单束入射光分成多束出射光来得到阵列光阱,全息光镊可以将微粒排列成任意的复杂图案。阵列中的每个光阱都可被独立控制,从而可实现复杂的多微粒动态操纵,如图 4 所示^[55]。其中图 4(a)~(c)所示是先向外移动被虚线圆标注的四个二氧化硅小球,其余四个保持不动;图 4(d)~(f)中虚线圆标注的另外四个二氧化硅小球绕中心作圆周运动,同时外侧的那四个二氧化硅小球沿着图 4(d)中白色箭头所示方向作近似简谐运动。

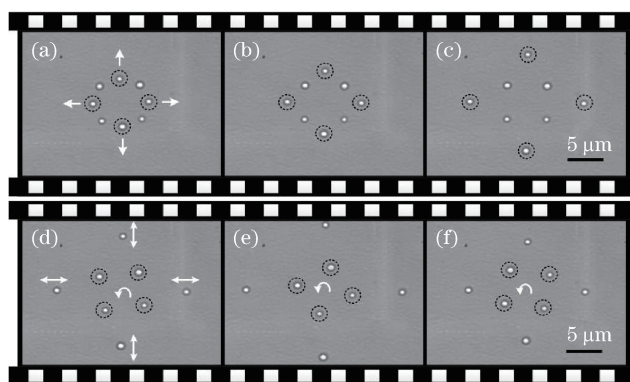


图 4 全息光镊动态操纵直径 $1 \mu\text{m}$ 的二氧化硅小球。(a)~(c)虚线圆标注的四个小球向外移动,其余四个保持不动;
(d)~(f)虚线圆标注的四个小球绕中心作圆周运动,外侧的四个小球在不同方向作近似简谐运动^[55]

Fig. 4 Dynamic manipulation of $1 \mu\text{m}$ -diameter silica beads by HOT. (a)~(c) Four beads marked by the dashed circles move outward while the others remain still; (d)~(f) other four beads marked by the dashed circles run in circular trace while the former four beads run at harmonic motion^[55]

由于光场的强度梯度可以将高折射率微粒束缚在光场强度最大处,而相位梯度可以驱动微粒运动,全息光镊可产生具有特定强度和相位分布的曲线光场来驱动微粒沿特定轨迹运动。图 5 所示是利用入射光场两

次通过同一个 SLM 来分别调制光场的振幅和相位得到的曲线光场操纵聚苯乙烯小球的实验结果^[56]。图中第一行的小球沿着正方形轨迹逆时针运动,第二行的小球沿一条闭合曲线运动。Wu 等^[41]利用 GS 迭代算法调制产生了具有相位梯度的线状光阱,实现了对微粒的捕获与驱动,其中微粒的运动方向通过相位梯度方向来控制。

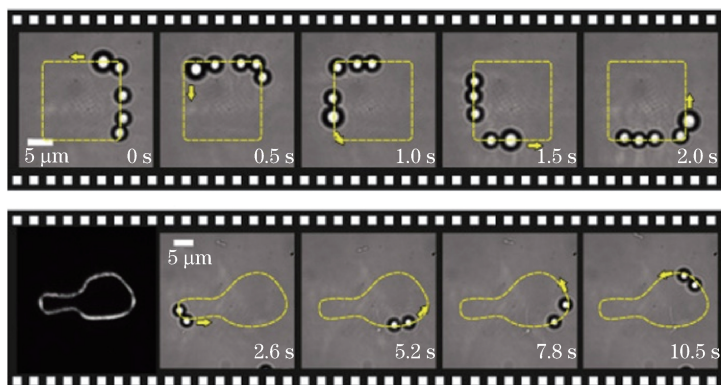


图 5 利用具有相位梯度的曲线光场微操纵微粒^[56]

Fig. 5 Micro-manipulation of particles using curved optical fields with phase gradient^[56]

除了产生二维平面光场分布,全息光镊技术还可以产生三维光场分布实现对微粒的三维捕获和操纵。这类光场具有连续的三维空间强度和相位分布,如螺线管光束^[57],可以使微粒沿光场轨迹运动。基于光传播可逆性问题而产生的三维光场,其曲线轨迹不是任意的。2013 年 Rodrigo 等^[58]提出一种基于非迭代光束整形方法,可以产生沿任意三维曲线的具有特定强度和相位分布的光束。利用这种方法他们实现了波浪形圆环光场对微粒的微操纵,如图 6 所示^[59],三种曲线光场在轴向具有不同的周期结构,微粒的运动方向由沿光场轨迹的相位梯度来控制。这与点光阱的动态微操纵不同,点光阱的动态微操纵是通过改变加载到 SLM 上的 CGH 来移动点光阱的位置实现对微粒的移动,而曲线光场则是利用光场的相位梯度力驱动微粒沿光场的特定轨迹运动。

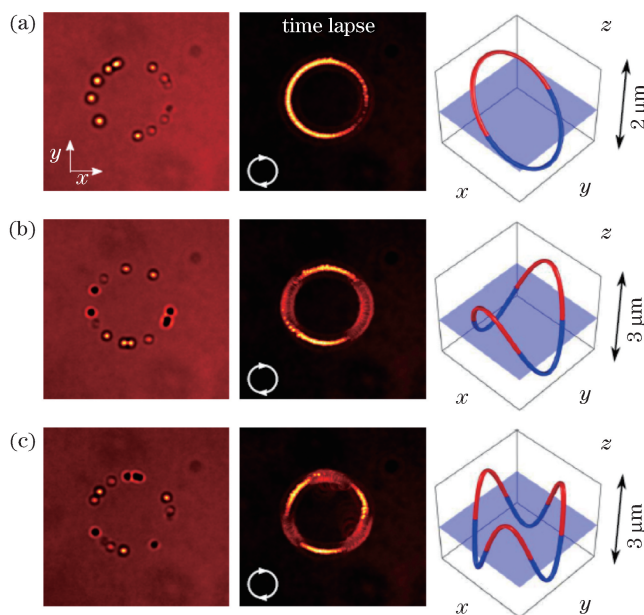


图 6 三维曲线光场微操纵微粒。(a) 倾斜的圆环光场;(b)(c) 具有不同轴向周期的波浪形圆环光场^[59]

Fig. 6 Micro-manipulation of particles with 3D curved optical fields. (a) Tilted ring trap;

(b) (c) waved ring traps with different axial periodic structures^[59]

3.2 特殊模式光束微操纵

所谓特殊模式光束,是指具有特殊空间相位分布和传播性质的光束,包括自相似光束、无衍射光束以及

自弯曲的加速光束,它们均为波动方程的解。其中自相似光束:厄米-高斯(HG)光束、拉盖尔-高斯(LG)光束、因斯-高斯(IG)光束分别是近轴条件下波动方程在直角坐标系、圆柱坐标系、椭圆柱坐标系下的自相似解。而无衍射光束:贝塞尔光束、马提厄光束、抛物线柱光束分别为圆柱坐标系、椭圆柱坐标系、抛物线柱坐标系中的无衍射解。类似地,在圆柱坐标系、椭圆柱坐标系、抛物线柱坐标系中寻求加速解,可以获得圆加速光束、马提厄加速光束、韦伯加速光束。通常提到的艾里光束可看作是韦伯加速光束在近轴条件下的近似解。图7给出了几种特殊模式光束传播的光强分布示意图,括号内数字表示光束的模式阶数,左下角插图是光束的横截面强度分布。自相似光束在传播过程中横向强度分布的形状不变,但光束会逐渐发散。无衍射光束主瓣的横向强度分布在传播过程中保持不变,即传播不变性。艾里光束的主瓣沿抛物线轨迹传播,且具有无衍射特性。由于实际光束的横向尺度是有限的,实际产生的无衍射光束都是近似无衍射光束,即光束在一定距离内具有传播不变性。

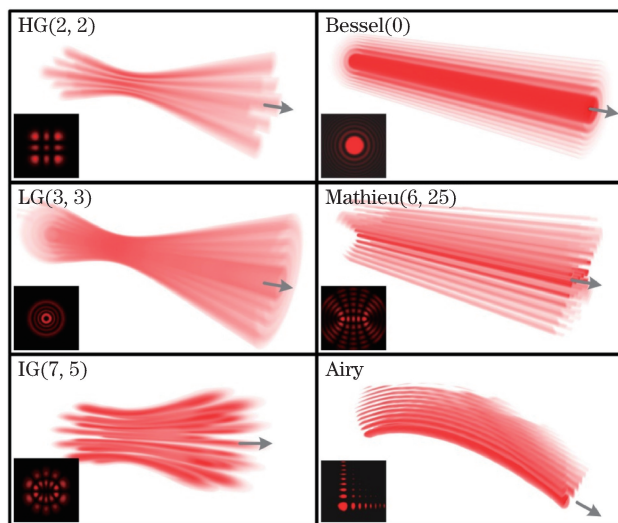


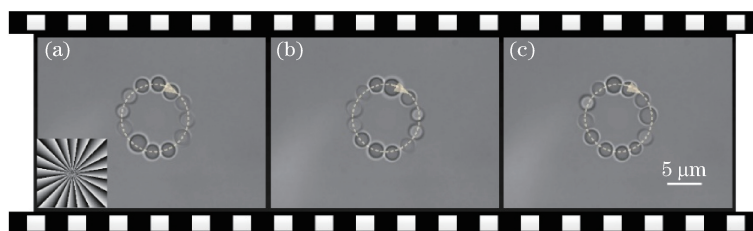
图7 几种特殊模式光束传播的光强分布示意图

Fig. 7 Propagating intensity distribution diagram of some special-mode beams

特殊模式光束在数学上具有特定的表达式,一般可以在激光器谐振腔内直接产生。在腔外产生特殊模式光束需借助其他技术将普通高斯光转换成特殊模式光束,例如用相位型SLM可以调制产生拉盖尔-高斯光束^[60]、贝塞尔光束^[61]和艾里光束^[62]等特殊模式光束。如果将特殊模式光束的调制与全息光场整形技术结合起来,则可以产生特殊模式光束阵列^[63]。虽然特殊模式光束可以通过全息光场整形或复振幅调制技术来产生,但是由于其具有比较特殊的相位分布及传播特性,因此本文将特殊模式光束微操纵与全息光镊技术区别对待。特殊模式光束除了应用在光学微操纵领域外,在光通信、光学显微成像^[64]等领域也具有广泛应用。

3.2.1 自相似光束微操纵

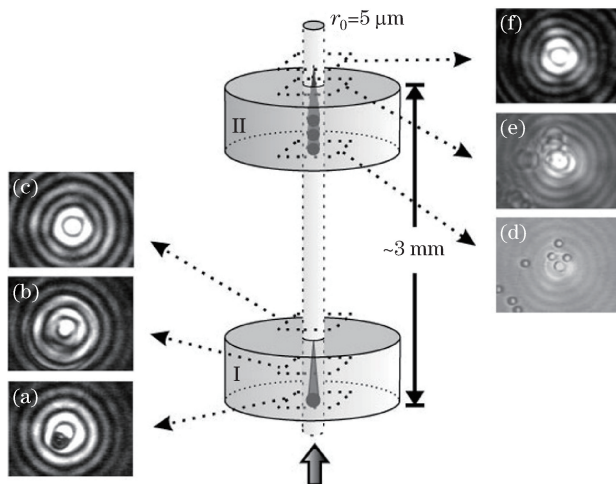
作为一种自相似光束,拉盖尔-高斯光束的一个主要特征是具有螺旋型相位分布 $\exp(i l \theta)$,其中 l 称为拓扑荷数, θ 是绕光轴的方位角,符合涡旋光束的特征,光轴上的点是相位奇点,其横截面上的光强分布为中空环形分布,螺旋型相位分布使得光束的坡印廷矢量具有角向分量,光束中的每个光子都携带 $l \hbar$ 的轨道角动量(OAM)。因此,LG光束是一种典型的涡旋光束(除此之外,高阶贝塞尔光束也是一种涡旋光束)。具有轨道角动量的涡旋光束经物镜聚焦后,可以将高折射率的微粒限制在环形焦场上并使其做轨道旋转运动。1992年Allen等^[65]首先从理论上证明了LG光束与微粒作用的轨道角动量传递。1997年Simpson等^[66]从实验上给出了验证。利用涡旋光驱动微粒作轨道运动,可以研究光子轨道角动量的传递与拓扑荷数大小、符号等因素的关系。图8所示是利用拓扑荷数 $l=20$ 的LG光束经物镜聚焦后捕获和驱动多个二氧化硅小球作轨道旋转运动的实验结果^[55],图8(a)中的左下角插图为拓扑荷数 $l=20$ 的螺旋相位的CGH图。12个二氧化硅小球沿虚线圆形轨道顺时针方向旋转,改变拓扑荷的符号可以使小球沿逆时针方向旋转,改变拓扑荷的大小可以改变轨道半径和微粒的旋转速度。这种光学轨道角动量传递给微粒使其获得力矩的效应,将普通光镊的功能升级为光学扳手。

图 8 利用聚焦的 LG 光束旋转直径 $2.5 \mu\text{m}$ 的二氧化硅小球^[55]Fig. 8 Rotation of $2.5 \mu\text{m}$ -diameter silica beads driven by a focused LG beam^[55]

除了携带轨道角动量, LG 光束的空心焦场特性可以用来捕获和旋转低折射率的微粒^[67],它具有比高斯光束更高的轴向捕获效率,可以捕获金属微粒^[68]。LG 光束的焦场环半径随着拓扑荷数的增加而增加,导致应用受到了限制。为此, Ostrovsky 等^[69]提出了完美涡旋光的概念,即涡旋光的焦场环半径不随其拓扑荷数增加而改变。Chen 等^[70]利用这样的光场实现了微粒的捕获及轨道运动特性分析。另外,分数阶 LG 光束也是目前涡旋光束的一个研究热点。这种光束的局域轨道角动量和强度分布在角向是不均匀的, Tao 等^[71]利用这种涡旋光束实现了微粒的旋转操纵, 山东师范大学的 Guo 等^[18]则利用分数阶涡旋光阵列实现了对微粒的运输与分选。

3.2.2 无衍射光束微操纵

在无衍射光束中,贝塞尔光束是应用最为广泛的一种,特别是在显微成像和光学微操纵方面。利用零阶贝塞尔光束的无衍射和自愈合特性,可以实现多平面同时捕获和操纵多微粒^[72],以及对微粒进行分选与运输^[73]。图 9 所示是利用零阶贝塞尔光束在两个纵向相距 3 mm 的样品池中同时对微粒进行捕获与操纵的结果^[72],可以看到,图 9(a)和(d)是在样品池 I 和 II 的不同深度处同时捕获了微粒,图 9(c)和(f)两图则证明了贝塞尔光束的自愈合特性。如果采用两束贝塞尔光束,使其相向传播进行干涉叠加,则会形成光学传输带,这种光学传输带可以捕获和运输微粒达几百微米长度^[19]。利用贝塞尔光束在轴向可以同时操纵多胶体微粒的特点,还可以研究胶体的基本物理性质,如双稳态特性^[74]等。

图 9 利用零阶贝塞尔光束进行多平面同时捕获与操纵微粒^[72]Fig. 9 Simultaneous multi-plane trapping and manipulating of micro-particles with a zero-order Bessel beam^[72]

近年来,贝塞尔光束被发现对特定微粒具有负向牵引力作用,即可以牵引微粒向着光源方向运动,而不是通常的排斥粒子远离光源方向运动^[75-76]。这种可以沿着光束轨迹牵引微粒向光源方向运动的光束被称为 Tractor 光束^[75]。光学负向牵引的实现取决于诸多条件,包括激光波长、激光模式、微粒尺寸、吸收和折射率等^[77]。

加速光束可以绕开某些障碍物将微粒运输到特定位置,因此加速光束微操纵在生物医学、化学和胶体物理等领域有着很好的应用前景。艾里光束作为一种无衍射的自弯曲加速光束,近几年来在光学微操纵和光学显微领域引起了人们的较多关注。艾里光束的主瓣轨迹为抛物线,理论上可以驱动微粒沿抛物线轨迹运动^[78]。2008 年,英国圣安德鲁斯大学的 Dholakia 小组^[79]首次在实验上实现了艾里光束在光学微操纵中的

应用,证明了艾里光束具有类似吹雪机的效果,可以将微粒从旁瓣所在区域转移到主瓣区域。利用艾里光束的这种特性,还实现了被微槽分隔的微粒和细胞的转运和重新分布^[80],以及清理光传播过程中遇到的杂质微粒^[81]。通常,一维和二维艾里光束在其传播过程中会沿一侧弯曲,而圆艾里光束在传播过程中则会逐渐向中心会聚。Zhang 等^[82]通过实验产生了具有自会聚特性的圆艾里光束并实现了对微粒的捕获与运输,还利用多束艾里光束叠加的方法产生了近似的自会聚圆艾里光束^[83]。这种具有自会聚特性的光束既可以在光束会聚处提供较高的捕获效率,也可以实现多微粒的同时运输,为光学微操纵提供了一种更丰富的技术手段。艾里光束等加速光束可以沿弯曲轨迹运输微粒,如果结合螺旋相位分布,则可以在运输微粒的同时驱动微粒作轨道圆周运动。基于此原理,Zhao 等^[84]通过实验产生了沿任意路径的空心无衍射加速光束,并利用此光束在多个轴平面上实现了对微粒的旋转操纵。

3.3 矢量光场微操纵

偏振态是影响光场焦场特性的重要因素之一,特别是对于强聚焦光场。常见的线偏振光、圆偏振光及椭圆偏振光都属于均匀偏振光,其偏振态分布不随空间发生变化,也可称为标量光场。偏振态分布随空间发生变化的光场称为矢量光场。

柱矢量光束是应用最广泛的一种矢量光场,其偏振态在空间上呈绕光轴的柱对称分布,典型的两种是径向偏振光束和方位角偏振光束(或称为角向偏振光束)。强聚焦下的径向偏振光束具有很强的轴向电场分量^[20],因而极大地降低了对粒子的轴向散射力,因此具有比线偏振光和圆偏振光更高的轴向捕获效率^[85],可以捕获其他光束难以捕获的纳米微粒和金属微粒^[21-22]。与之相反,强聚焦下的方位角偏振光没有轴向电场分量,其焦场呈空心分布,因此可以捕获低折射率微粒^[86]。柱矢量光束也可以作为牵引光束,Shvedov 等^[87]证明了径向偏振光和方位角偏振光对于镀金空心玻璃微球分别具有沿光轴方向上的排斥力和牵引力作用,如图 10 所示,其中图 10(a)是镀金空心微球在方位角偏振光束和径向偏振光束中的运动示意图,图 10(b)是不同半径微球在两种柱矢量光束中的运动速度关系图,正负表示受力方向, a 表示微球外壳半径。借助于光泳力作用,方位角偏振光束可以牵引镀金空心玻璃微球向着光源方向移动,起到类似 Tractor 光束的作用。

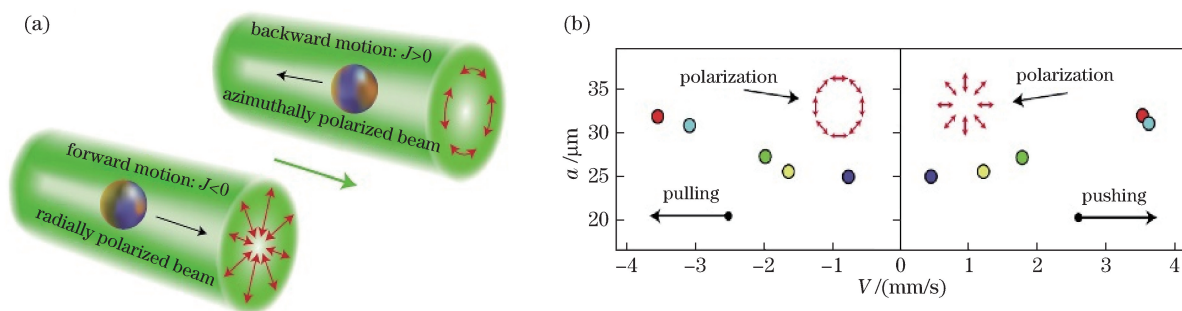


图 10 (a) 镀金空心玻璃微球在方位角偏振光束和径向偏振光束中的运动示意图;

(b) 微球运动速度与微球外壳半径的变化关系^[87]

Fig. 10 (a) Illustration of motion of hollow Au-coated glass spheres in azimuthally and radially polarized beams;

(b) dependence of the velocity of the sphere on the radius of its external shell^[87]

通过调制矢量光场的振幅或相位可以获得更好或更奇特的光学捕获性能。例如通过调制产生环形的径向偏振光^[88]或者是具有 $0 \sim \pi$ 相位间隔分布的双环径向偏振光^[89],可以进一步提高对微粒的轴向捕获效率。将矢量光场与涡旋光场相结合,可以对微粒在不同偏振涡旋光场中的受力和力矩进行分析,研究偏振态对粒子光致轨道运动和自旋运动的影响^[90]。将矢量光场与全息光场整形技术结合起来,可以产生具有不同偏振态分布的光阱阵列,实现功能更加丰富的光学微操纵。图 11 所示是 Preece 等^[91]通过产生两个具有不同偏振态的光阱实现对两个双折射晶体微粒的姿态和位置操纵,其中直线箭头表示线偏振态,圆形箭头表示左右旋圆偏振态。图 11(a)演示的是通过控制两个光阱的偏振态和位置可以对微粒进行静态捕获、左右自旋和位置移动操作;图 11(b)是双折射晶体微粒在两种不同线偏振光阱中的不同取向结果。

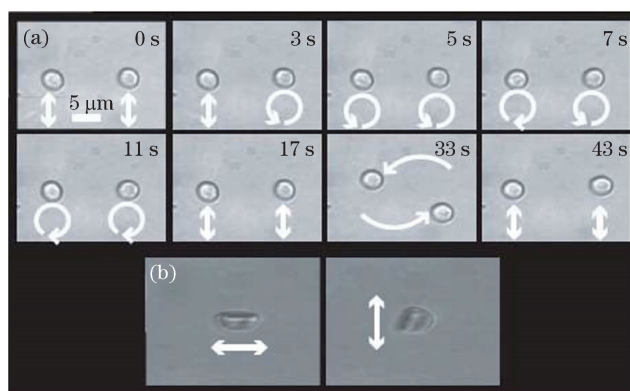


图 11 (a) 两个双折射晶体微粒在不同偏振光阱中的运动状态;(b) 通过控制光阱偏振态来改变微粒取向^[91]

Fig. 11 (a) Motion states of two birefringent crystal particles in traps with different polarization states;
(b) change of particle orientation due to change in polarization state of the trap^[91]

4 结束语

空间光场调控技术在许多研究领域发挥着重要的作用。以光场的三个基本物理量——振幅、相位和偏振态为基础,本文综述了基于相位型液晶空间光调制器的光场相位调制、复振幅调制和偏振态调制技术。利用相位型空间光调制器加载计算全息图可以产生任意复杂的光场强度分布,其中计算全息图算法是核心。振幅与相位同时调制的直接方法是采用两个级联的空间光调制器;利用超像素法、复编码法和 GS 迭代算法,在一定近似条件下可以实现基于单个空间光调制器的复振幅调制。对于光场偏振态的调制,一般是通过叠加具有特定空间相位差分布的两束圆偏振光或线偏振光来实现;对于特殊矢量光束如柱矢量光束,还可以利用具有特殊微纳结构的光学元件将线偏振光直接转换为柱矢量光束。

空间光场调控技术极大地丰富了光学微操纵技术手段和应用范围。全息光镊、特殊模式光束微操纵和矢量光场微操纵技术得到了快速的发展。相比于传统的单光阱光镊,全息光镊具有多微粒实时、动态、三维空间独立操控的优点,还可以实现沿任意三维曲线光场对微粒进行操纵。特殊模式光束在光学微操纵中的应用日益广泛与深入,特别是具有涡旋相位的拉盖尔-高斯光束和具有无衍射和自弯曲特性的艾里光束。特殊模式光束对于微粒的分选与输运等微流控制研究具有重要意义。矢量光场,特别是柱矢量光束,近年来在光学微操纵中的应用也取得了大量成果。通过对光场偏振态与相位/振幅的联合调制,可以获得更加丰富和奇特的光学微操纵性能。

参 考 文 献

- 1 Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Phys Rev Lett*, 1970, 24(4): 156-159.
- 2 Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, *et al*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Opt Lett*, 1986, 11(5): 288-290.
- 3 Marago O, Jones P, Bonaccorso F, *et al*. Femtonewton force sensing with optically trapped nanotubes[J]. *Nano Lett*, 2008, 8(10): 3211-3216.
- 4 Svoboda K, Block S M. Biological applications of optical forces[J]. *Annu Rev*, 1994, 23: 247-285.
- 5 Veigel C, Schmidt C F. Moving into the cell: Single-molecule studies of molecular motors in complex environments[J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2011, 12(3): 163-176.
- 6 Crocker J C, Matteo J A, Dinsmore A D, *et al*. Entropic attraction and repulsion in binary colloids probed with a line optical tweezer[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 82(21): 4352-4355.
- 7 Metzger N K, Dholakia K, Wright E M. Observation of bistability and hysteresis in optical binding of two dielectric spheres[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(6): 068102.
- 8 Chuu C S, Strassel T, Zhao B, *et al*. Quantum memory with optically trapped atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(12): 120501.
- 9 Muldoon C, Brandt L, Dong J, *et al*. Control and manipulation of cold atoms in optical tweezers[J]. *New J Phys*, 2012,

- 14(7): 073051.
- 10 MacDonald M, Spalding G, Dholakia K. Microfluidic sorting in an optical lattice[J]. *Nature*, 2003, 426(6965): 421-424.
- 11 Visscher K, Gross S P, Block S M. Construction of multiple-beam optical traps with nanometer-resolution position sensing[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 1996, 2(4): 1066-1076.
- 12 Dufresne E R, Grier D G. Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69(5): 1974-1977.
- 13 Dufresne E R, Spalding G C, Dearing M T, *et al.* Computer-generated holographic optical tweezer arrays[J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, 73(2): 1810-1816.
- 14 Curtis J E, Koss B A, Grier D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt Commun*, 2002, 207: 169-175.
- 15 Roichman Y, Sun B, Roichman Y, *et al.* Optical forces arising from phase gradients[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(1): 013602.
- 16 Dutra R S, Viana N B, Neto P A M, *et al.* Polarization effects in optical tweezers[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2007, 9(8): S221.
- 17 Wang X L, Chen J, Li Y, *et al.* Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(25): 253602.
- 18 Guo C S, Yu Y N, Hong Z. Optical sorting using an array of optical vortices with fractional topological charge[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(9): 1889-1893.
- 19 Čižmár T, Garcés-Chávez V, Dholakia K, *et al.* Optical conveyor belt for delivery of submicron objects[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(17): 174101.
- 20 Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- 21 Michihata M, Hayashi T, Takaya Y. Measurement of axial and transverse trapping stiffness of optical tweezers in air using a radially polarized beam[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(32): 6143-6151.
- 22 Huang L, Guo H, Li J, *et al.* Optical trapping of gold nanoparticles by cylindrical vector beam[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(10): 1694-1696.
- 23 Yu X, Yao B, Lei M, *et al.* Polarization-sensitive diffractive optical elements fabricated in BR films with femtosecond laser[J]. *Appl Phys B*, 2014, 115(3): 365-369.
- 24 Ren H, Li X, Gu M. Polarization-multiplexed multifocal arrays by a pi-phase-step-modulated azimuthally polarized beam[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(24): 6771-6774.
- 25 Allegre O J, Jin Y, Perrie W, *et al.* Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 21198-21207.
- 26 Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- 27 Auyeung R C Y, Kim H, Charipar N A, *et al.* Laser forward transfer based on a spatial light modulator[J]. *Appl Phys A*, 2010, 102(1): 21-26.
- 28 Lutz C, Otis T S, DeSars V, *et al.* Holographic photolysis of caged neurotransmitters[J]. *Nat Methods*, 2008, 5(9): 821-827.
- 29 Liesener J, Reicherter M, Haist T, *et al.* Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms[J]. *Opt Commun*, 2000, 185(1): 77-82.
- 30 Montes-Usategui M, Pleguezuelos E, Andilla J, *et al.* Fast generation of holographic optical tweezers by random mask encoding of Fourier components[J]. *Opt Express*, 2006, 14(6): 2101-2107.
- 31 Meister M, Winfield R J. Novel approaches to direct search algorithms for the design of diffractive optical elements[J]. *Opt Commun*, 2002, 203: 39-49.
- 32 Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- 33 Rinne J W, Wiltzius P. Design of holographic structures using genetic algorithms[J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 9909-9916.
- 34 Sun Qing, Ren Yuxuan, Yao Kun, *et al.* Algorithm for diffractive optical element of array optical tweezers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0109003.
- 孙 晴, 任煜轩, 姚 焜, 等. 阵列光镊衍射元件的算法设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0109003.
- 35 Xu Shuwu, Zhou Qiaoqiao, Gu Songbo, *et al.* Generation of the three-dimensional array of optical trap by spatial light

- modulator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 223702-223702.
- 徐淑武, 周巧巧, 顾宋博, 等. 用空间光调制器产生三维光阱阵列[J]. *物理学报*, 2012, 61(22): 223702-223702.
- 36 Jesacher A, Maurer C, Schwaighofer A, *et al.* Full phase and amplitude control of holographic optical tweezers with high efficiency[J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4479-4486.
- 37 Goorden S A, Bertolotti J, Mosk A P. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device[J]. *Opt Express*, 2014, 22(15): 17999-18009.
- 38 Davis J A, Cottrell D M, Campos J, *et al.* Encoding amplitude information onto phase-only filters[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(23): 5004-5013.
- 39 Arrizón V, Ruiz U, Carrada R, *et al.* Pixelated phase computer holograms for the accurate encoding of scalar complex fields[J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(11): 3500.
- 40 Mendoza-Yero O, Minguez-Vega G, Lancis J. Encoding complex fields by using a phase-only optical element[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(7): 1740-1743.
- 41 Wu L, Cheng S, Tao S. Simultaneous shaping of amplitude and phase of light in the entire output plane with a phase-only hologram[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 15426.
- 42 Zuchner T, Failla A V, Meixner A J. Light microscopy with doughnut modes: A concept to detect, characterize, and manipulate individual nanoobjects[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50(23): 5274-5293.
- 43 Liang Y, Yan S, Yao B, *et al.* Generation of cylindrical vector beams based on common-path interferometer with a vortex phase plate[J]. *Opt Eng*, 2016, 55(4): 046117.
- 44 Maurer C, Jesacher A, Fürhapter S, *et al.* Tailoring of arbitrary optical vector beams[J]. *New J Phys*, 2007, 9(3): 78.
- 45 Kenny F, Lara D, Rodríguez-Herrera O G, *et al.* Complete polarization and phase control for focus-shaping in high-NA microscopy[J]. *Opt Express*, 2012, 20(13): 14015-14029.
- 46 Liu S, Li P, Peng T, *et al.* Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer[J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 21715-21721.
- 47 Chen H, Hao J, Zhang B F, *et al.* Generation of vector beam with space-variant distribution of both polarization and phase[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3179-3181.
- 48 Lin D, Xia K, Li R, *et al.* Radially polarized and passively Q-switched fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(21): 3574-3576.
- 49 Beresna M, Gecevicius M, Kazansky P G, *et al.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(20): 201101.
- 50 Viswanathan N K, Inavalli V V G K. Generation of optical vector beams using a two-mode fiber[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1189-1191.
- 51 Han W, Yang Y, Cheng W, *et al.* Vectorial optical field generator for the creation of arbitrarily complex fields[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 20692-20706.
- 52 Tao T, Li J, Long Q, *et al.* 3D trapping and manipulation of micro-particles using holographic optical tweezers with optimized computer-generated holograms[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(12): 120010-120013.
- 53 Tao S H, Yuan X C, Niu H B, *et al.* Dynamic optical manipulation using intensity patterns directly projected by a reflective spatial light modulator[J]. *Rev Sci Instrum*, 2005, 76(5): 056103(1)-056103(3).
- 54 Chen H, Guo Y, Chen Z, *et al.* Holographic optical tweezers obtained by using the three-dimensional Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *J Opt*, 2013, 15(3): 035401.
- 56 Liang Yansheng, Yao Baoli, Ma Baiheng, *et al.* Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0309001.
- 梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0309001.
- 56 Zhu L, Wang J. Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators[J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 7441.
- 57 Lee S H, Roichman Y, Grier D G. Optical solenoid beams[J]. *Opt Express*, 2010, 18(7): 6988-6993.
- 58 Rodrigo J A, Alieva T, Abramochkin E, *et al.* Shaping of light beams along curves in three dimensions[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 20544-20555.
- 59 Rodrigo J A, Alieva T. Freestyle 3D laser traps: tools for studying light-driven particle dynamics and beyond[J]. *Optica*, 2015, 2(9): 812.
- 60 Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, *et al.* Laser beams with phase singularities[J]. *Opt Quant Electron*, 1992, 24:

S951-S962.

- 61 Chattrapiban N, Rogers E A, Cofield D, *et al.* Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(22): 2183-2185.
- 62 Yu Xianghua, Yao Baoli, Lei Ming, *et al.* Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 244203.
于湘华, 姚保利, 雷 铭, 等. 无衍射特殊模式光束的产生与三维表征物理学报[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 244203.
- 63 Yu X, Li R, Yan S, *et al.* Experimental demonstration of 3D accelerating beam arrays[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(11): 3090-3095.
- 64 Vettenburg T, Dalgarno H I, Nylk J, *et al.* Light-sheet microscopy using an Airy beam[J]. *Nat Methods*, 2014, 11(5): 541-544.
- 65 Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Phys Rev A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- 66 Simpson N B, Dholakia K, Allen L, *et al.* Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(1): 52-54.
- 67 Gahagan K, Swartzlander G. Optical vortex trapping of particles[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(11): 827-829.
- 68 Dienerowitz M, Mazilu M, Reece P J, *et al.* Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles[J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4991-4999.
- 69 Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using aliquid-crystal spatial light modulator[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 534-536.
- 70 Chen M, Mazilu M, Arita Y, *et al.* Dynamics of microparticles trapped in a perfect vortex beam[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(22): 4919-4922.
- 71 Tao S, Yuan X C, Lin J, *et al.* Fractional optical vortex beam induced rotation of particles[J]. *Opt Express*, 2005, 13(20): 7726-7731.
- 72 Garcés-Chavez V, McGloin D, Melville H, *et al.* Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 145-147.
- 73 Carruthers A E, Walker J S, Casey A, *et al.* Selection and characterization of aerosol particle size using a Bessel beam optical trap for single particle analysis[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2012, 14(19): 6741-6748.
- 74 Karásek V, Čížmár T, Brzobohatý O, *et al.* Long-range one-dimensional longitudinal optical binding[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(14): 143601.
- 75 Sukhov S, Dogariu A. On the concept of “tractor beams”[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(22): 3847-3849.
- 76 Chen J, Ng J, Lin Z, *et al.* Optical pulling force[J]. *Nat Photonics*, 2011, 5(9): 531-534.
- 77 Sáenz J J. Optical forces: Laser tractor beams[J]. *Nat Photonics*, 2011, 5(9): 514-515.
- 78 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(3): 207-209.
- 79 Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nat Photonics*, 2008, 2(11): 675-678.
- 80 Baumgartl J, Hannappel G M, Stevenson D J, *et al.* Optical redistribution of microparticles and cells between microwells[J]. *Lab Chip*, 2009, 9(10): 1334-1336.
- 81 Baumgartl J, Čížmár T, Mazilu M, *et al.* Optical path clearing and enhanced transmission through colloidal suspensions[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17130-17140.
- 82 Zhang P, Prakash J, Zhang Z, *et al.* Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 2883-2885.
- 83 Zhang Ze, Liu Jingjiao, Zhang Peng, *et al.* Generation of autofocusing beams with multi-Airy beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 034209.
张 泽, 刘京郊, 张 鹏, 等. 多艾里光束合成自聚焦光束的实验实现[J]. *物理学报*, 2013, 62: 034209.
- 84 Zhao J, Chremmos I D, Song D, *et al.* Curved singular beams for three-dimensional particle manipulation[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 12086.
- 85 Yan S, Yao B. Radiation forces of a highly focused radially polarized beam on spherical particles[J]. *Phys Rev A*, 2007, 76(5): 053836.
- 86 Peng F, Yao B, Yan S, *et al.* Trapping of low-refractive-index particles with azimuthally polarized beam[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(12): 2242-2247.
- 87 Shvedov V, Davoyan A R, Hnatovsky C, *et al.* A long-range polarization-controlled optical tractor beam[J]. *Nat Photonics*,

- 2014, 8(11): 846-850.
- 88 Xu H F, Zhang W J, Qu J, *et al.* Improving the trapping capability using radially polarized narrow-width annular beam [J]. J Mod Opt, 2014, 63(5): 1-6.
- 89 Yao B L, Yan S H, Ye T, *et al.* Optical trapping of double-ring radially polarized beam with improved axial trapping efficiency[J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(10): 108701.
- 90 Li M, Yan S, Yao B, *et al.* Optically induced rotation of Rayleigh particles by vortex beams with different states of polarization[J]. Phys Lett A, 2016, 380(1): 311-315.
- 91 Preece D, Keen S, Botvinick E, *et al.* Independent polarisation control of multiple optical traps[J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15897-15902.