

一种 V 型 Ince-Gaussian 光束空间模式 分布特性研究

张浩^{1,2}, 马海祥^{1,2}, 李新忠^{1,2}, 李贺贺^{1,2}, 唐苗苗^{1,2},
王静鸽^{1,2}, 汤洁³, 王屹山³, 聂兆刚⁴, 李秀芳⁵

¹河南科技大学物理工程学院, 河南 洛阳 471023;

²河南省光电储能材料与应用重点实验室, 河南 洛阳 471023;

³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;

⁴广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006;

⁵大恒新纪元科技股份有限公司北京光电研究所, 北京 100085

摘要 基于特定参数下的因斯高斯 Ince-Gaussian(IG)光束的奇偶模式线性叠加,提出了一种每个光瓣均为“V”字形的光束模式(VIG 模式)。通过实验与数值模拟对所提 VIG 模式进行分析研究,结果发现 VIG 模式的“V”字形光瓣个数为其阶数的两倍。通过给奇偶模式施加一个初始相位差可以自由调控“V”字形光瓣连续分离为一大一小两个光瓣,并且可以对调两个光瓣的空间位置。通过力场分析发现,VIG 模式有望应用于细胞分选。通过两个偶模一个奇模阶数比为 1:3:2 进行叠加,可以生成三个分支的 VIG 模式。

关键词 物理光学; 因斯高斯模式; 空间模式分布; 力场分析

中图分类号 O436; O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0626001

Spatial Mode Distribution of a V-Shaped Ince-Gaussian Beam

Zhang Hao^{1,2}, Ma Haixiang^{1,2}, Li Xinzhong^{1,2}, Li Hehe^{1,2}, Tang Miaomiao^{1,2},
Wang Jingge^{1,2}, Tang Jie³, Wang Yishan³, Nie Zhaogang⁴, Li Xiufang⁵

¹ School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

² Henan Key Laboratory of Photoelectric Energy Storage Materials and Applications, Luoyang, Henan 471023, China;

³ 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;

⁴ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

⁵ Daheng New Epoch Technology Inc., Beijing 100085, China

Abstract Based on the linear superposition of the odd and even modes of the Ince-Gaussian (IG) beam, a novel V-shaped IG beam mode is proposed, called as V-shaped Ince-Gaussian mode (VIG mode), in which each light petal has a V-shaped structure. The experimental and numerical simulation results show that the number of V-shaped petals is twice as much as the order of the VIG mode. Given an initial phase difference between the odd and even modes, each V-shaped petal in VIG modes is split into a large and a small light petals. Moreover, this splitting process is freely controlled and the spatial positions of these two separated petals are able to exchange. The analysis of the force field of the VIG mode shows that the VIG mode is expected to be a candidate beam for cell sorting. Further, if the linear superposition is conducted by two even modes and one odd mode with order ratio of 1:3:2, a three branches VIG mode can be generated.

收稿日期: 2017-11-06; 收到修改稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61775052,11704098)

作者简介: 张浩(1995—),男,硕士研究生,主要从事光场调控方面的研究。E-mail: zhanghao0689v@163.com

导师简介: 李新忠(1979—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光场调控、传输及应用方面的研究。

E-mail: xzli@haust.edu.cn(通信联系人)

Key words physical optics; Ince-Gaussian mode; spatial pattern distribution; force field analysis
OCIS codes 260.6042; 090.2890

1 引 言

近年来,随着激光技术的不断发展,相位结构光束已成为空间结构光场领域的一大研究热点^[1-6],广泛应用于量子信息编码^[7]、微粒的分选与控制^[8-11]、光学超分辨^[12]及光学图像处理^[13-14]等领域。其中,Ince-Gaussian(IG)光束^[15]以其空间模式的多样性成为该领域的一个研究热点。

2004年,Bandres等^[16-17]首次求解出了空间近轴波动方程在椭圆坐标系中的准确正交解,提出了IG光束的概念,并论证了IG光束具有丰富多样的模式分布,通过调节椭圆坐标系的参数,可以将IG光束转化为厄米高斯光束与拉盖尔高斯光束。之后的一系列研究致力于IG光束的产生与应用。2004年,Schwarz等^[18]第1次在稳定谐振腔中观察到IG模式。2006年,Bentley等^[19]通过振幅相位调制设计了产生IG光束的掩模板,并采用计算全息技术通过实验产生了IG光束的奇偶模式和Helical Ince-Gaussian(HIG)模式,为IG光束的应用奠定了条件。2008年,Chu等^[20]将IG光束应用于涡旋阵列的生成领域,生成了一种可调的涡旋阵列模式。2011年,Woerdemann等^[21]使用IG光束成功操纵了直径为1.5 μm的二氧化硅微粒,验证了IG光束丰富的横向模式分布在微粒操纵领域的独特优势。2016年,Peng等^[22]将IG光束、HIG光束分别与Airy光束相结合,在理论上提出了Airy-Ince-Gaussian和Airy-Helical-Ince-Gaussian光子弹,拓宽了IG光束的应用领域。为了进一步提高IG光束光场模式的调控灵活性,2017年,马海祥等^[23]提出一种初始相位因子调控的IG光束,极大地丰富了IG光束的光强模式,实现了IG光束光瓣模式在椭圆轨迹上的精确位移控制。

然而,IG光束作为一种横向光场模式最丰富的相位结构光束,对其模式分布多样性及其丰富模式独特应用的研究还远远不够。例如在微粒分选领域,IG光束的应用还仍未见报道。微粒的光学分选是指依据粒子对光场的不同响应(如大小、折射率等)对不同粒子进行不同的操控,以实现筛选粒子的目的。主要的分选方法为机械辅助方法^[24]和纯光学法^[25]。机械辅助法现已比较成熟,可以通过对不同粒子进行荧光标记,使用机器视觉技术对微粒进

行高效分选^[26],仅适用于有明确荧光标记的微粒的分选,实验装置成本较高。纯光学法的一个发展方向为微流辅助阵列光栅分选^[25],该方法可对大量不同尺寸和折射率的微粒进行分选,分选效率接近100%;另一个发展方向为适合于精细操作的微流辅助单光栅分选^[27]。2012年,Ma等^[28]使用两个柱透镜对两束激光进行聚焦生成了一种“Y”字形光阱,使不同尺寸的微粒分选进两个通道。然而该光路需要对两束激光进行耦合,给实验光路的调节带来了困难,难以应用于工业化生产。因此,生成一种类似形状的激光模式成为迫切需要解决的技术问题。

本文基于IG光束丰富的模式分布,提出了一种“V”型因斯高斯模式理论表达式,简称为VIG模式。通过模拟与实验生成研究了VIG模式分布,以及初始相位差对VIG模式分布的调控特性,并通过力场分析定性论证了VIG模式应用于细胞分选的可行性。

2 V型IG光束的产生方法

IG光束为空间近轴波动方程在椭圆坐标系上的准确正交解。在传输距离为 z 的光轴截面上,定义椭圆坐标系 (ξ, η) 为 $x = f(z) \cosh(\xi) \cos(\eta)$, $y = f(z) \sinh(\xi) \sin(\eta)$ 。其中: $\xi \in [0, \infty)$ 、 $\eta \in [0, 2\pi)$ 分别为径向和角向的椭圆变量; $f(z) = f_0 \omega(z) / \omega_0$ 为椭圆半焦距, f_0 为 $z = 0$ 平面处的半焦距, ω_0 为 $z = 0$ 处高斯光束的束腰半径, $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{(1 + z^2 / z_R^2)}$ 为高斯光束在 z 处的截面宽度, $z_R = k \omega_0^2 / 2$ 为瑞利长度, k 为波数。建立在该椭圆坐标系上的IG光束奇偶模式的电场表达式^[16]为

$$\text{IG}_{p,m}^e(\mathbf{r}, \epsilon) = \frac{C\omega_0}{\omega(z)} C_p^e(i\xi, \epsilon) C_p^m(\eta, \epsilon) \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{i\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - (p+1)\right] \Psi_{\text{GS}}(z)\right\}, \quad (1)$$

$$\text{IG}_{p,m}^o(\mathbf{r}, \epsilon) = \frac{S\omega_0}{\omega(z)} S_p^o(i\xi, \epsilon) S_p^m(\eta, \epsilon) \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{i\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - (p+1)\right] \Psi_{\text{GS}}(z)\right\}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{r} 为径向位置矢量; $\epsilon = 2f_0^2 / \omega_0^2$ 为椭圆参数; p 和 m 分别为奇偶模式IG光束的阶数和级数 $[1 \leq m \leq p, \text{且} (-1)^{p-m} = 1]$;e和o分别表示偶模和奇模IG光束; C 和 S 为归一化参数,其意义在于可以使不同阶数与级数的IG光束模式统一在同一个数量级

上; C_p^m 和 S_p^m 分别为阶数为 p 、级数为 m 的偶次和奇次 Ince 多项式; $R(z) = z + z_R^2/z$ 为光波前的曲率半径; $\Psi_{GS}(z) = \arctan(z/z_R)$ 为 Gouy 相移。

改变 IG 光束的阶数 p 与级数 m , (1)式、(2)式描述的 IG 光束奇偶模式会变成由 m 个双曲节点线与 $(p-m)/2$ 个椭圆节点线分割开的光瓣模式, 其椭圆节点线随着参数 p, m 的增大而增大。此外, 通过调节椭圆参数 ϵ 还可以改变双曲节点线与椭圆节点线焦点的位置, 实现 IG 模式向厄米高斯与拉盖尔高斯模式转换^[16]。因此, 不同参数下的 $IG_{p,m}^e$ 与 $IG_{p,m}^o$ 光束叠加可以形成更为丰富的模式分布, 为构造特殊形貌的光束创造了条件。考虑 $IG_{p,m}^e$ 和 $IG_{2p,2m}^o$ 叠加生成一种模式分布, 相应的电场表达式为

$$VIG_p = IG_{p,\epsilon}^e(\xi, \eta, \epsilon) + IG_{2p,\epsilon}^o(\xi, \eta, \epsilon) \quad (3)$$

在(3)式中, 模式分布阶数 p 与级数 m 相等, 因此将其看为一个参数 p 。此外, 该光束模式为一个椭圆节点线上分布的 $2p$ 个“V”字形光瓣, 因此称其为“V”型厄米高斯模式, 简称 VIG 模式。图 1 以

$p=6$ 为例展示生成的 VIG 模式。图中红色与白色虚线分别为 IG_6^e 模式、 IG_{12}^o 模式光强最亮点所在的椭圆节点线。图 1(c) 展示了两模式叠加的结果。当 IG^o 模式的阶数 p 为 IG^e 模式的两倍时, 由于 IG 光束光瓣所在的椭圆节点线随着阶数 p 的增大而增大^[16], 因此使得 IG^e 模式的每一个光瓣的外侧正好与 IG^o 模式每两个光瓣的内侧空间重合而形成干涉, 最终生成 VIG 模式。另外, 当 IG^e 模式的阶数 p 为 IG^o 模式的两倍时, IG^o 模式与 IG^e 模式光瓣角向空间位置并未完全匹配, 因而不能形成如图 1 所示的 VIG 模式。

此外, (3)式所描述的 VIG 模式必须满足两个限制条件: 角向光瓣数目条件与径向空间位置条件。角向光瓣数目条件即满足 IG^o 的阶数为 IG^e 的两倍, 以保证 IG^o 模式的每两个光瓣与 IG^e 模式的每一个光瓣相匹配; 径向空间位置条件指的是 IG^o 模式与 IG^e 模式在空间上有交叠。下文通过数值模拟与实验分析对所提 VIG 模式的生成、限制条件、力场分布等方面进行研究。

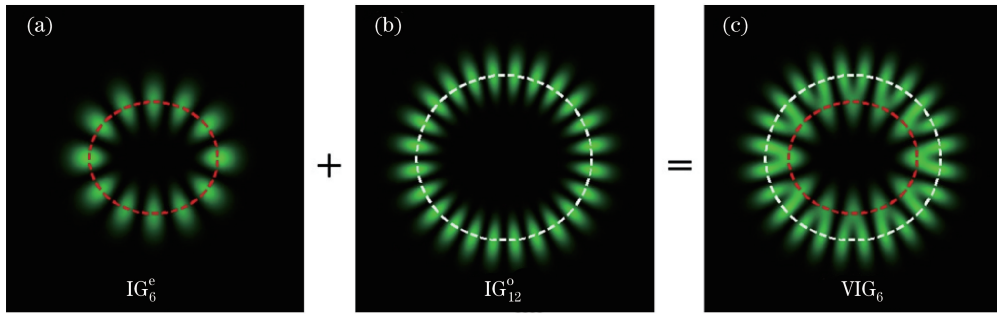


图 1 IG 奇、偶模式叠加生成 VIG 模式的过程。(a) IG_6^e 模式分布; (b) IG_{12}^o 模式分布; (c) VIG_6 模式分布
Fig. 1 Generation process of VIG mode based on IG even and odd mode superposition. (a) IG_6^e mode distribution; (b) IG_{12}^o mode distribution; (c) VIG_6 mode distribution

3 实 验

下面对上述理论生成的 VIG 模式进行实验分析, 所用实验光路如图 2 所示。由图 2 可见, 激光器发出 532 nm 的激光经空间针孔滤波器后再经光阑和凸透镜变为一束平行光, 平行光经起偏器和分束立方体后照射在写有相位掩模板的反射式空间光调制器(SLM)上, 由 SLM 调制后的光束经检偏器以及配合小孔光阑的 $4f$ 系统筛选出 SLM 的 +1 级衍射即为所需的 VIG 模式。最后使用 CCD 相机记录 VIG 模式的光强分布。

实验中所用连续波固体激光器的型号为 MGL-III-532-50 mW; SLM 为德国 Holoeye 公司的 PLUTO-VIS-016 型相位空间光调制器, 像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 填充

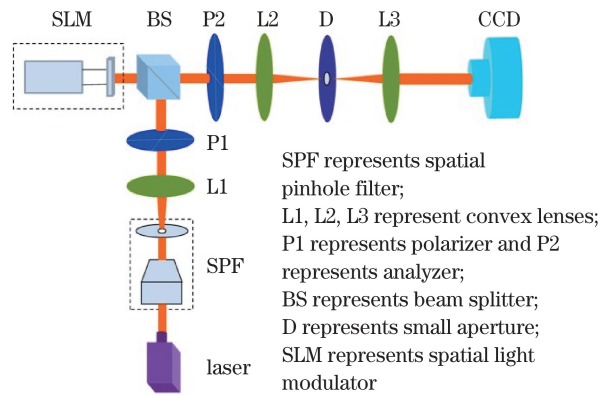


图 2 实验光路原理图
Fig. 2 Schematic of experimental light path

因子为 93%, 分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$; CCD 相机为 Basler acA1600-60gc 型彩色相机, 像素尺寸为

4.5 μm ,分辨率为 1600 pixel \times 1200 pixel。

基于计算全息技术,通过计算机编码得到振幅调制相位掩模板,并写入 SLM。使用周期为 d 的闪耀光栅生成的振幅调制相位掩模板的复透过率函数 $t^{[19]}$ 为

$$t = A(x, y) \exp \left[i \left(\Psi + \frac{2\pi x}{d} \right) \right], \quad (4)$$

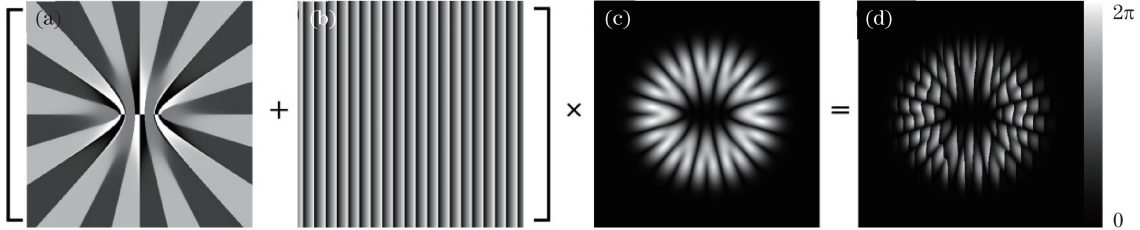


图 3 相位掩模板的产生示意图。(a) VIG 模式相位图;(b)闪耀光栅;
(c) VIG 模式的振幅分布 $A(x, y)$;(d)输入 SLM 中的相位掩模板

Fig. 3 Schematic of phase mask generation. (a) Phase pattern of VIG mode; (b) blazed grating;
(c) amplitude distribution $A(x, y)$ of VIG mode; (d) phase mask pattern in SLM

4 分析与讨论

基于上述实验装置,在椭圆参数 $\epsilon = 2$ 的情况下生成的 VIG 模式如图 4 所示。图 4 第 1 行为阶数 $p = 2, 4, 6, 8, 10$ 时生成 VIG 模式的实验光强

式中 $A(x, y)$ 和 Ψ 分别为 VIG 模式的振幅与相位。图 3 为该相位掩模板的产生过程,首先将 VIG 模式的相位(见图 3(a))与闪耀光栅(见图 3(b))叠加用以将 ± 1 级衍射与 0 级衍射分离。然后使用振幅调制(见图 3(c))得到振幅调制相位掩模板(见图 3(d)),最后通过计算机写入空间光调制器。

分布;第 2 行与第 3 行分别为对应的理论模拟光强图与相位图;相位图上绿色实线表示光强所在位置。实验中的每个“V”字形光瓣均清晰可辨,与模拟结果符合得非常好,为 VIG 模式的应用创造了条件。

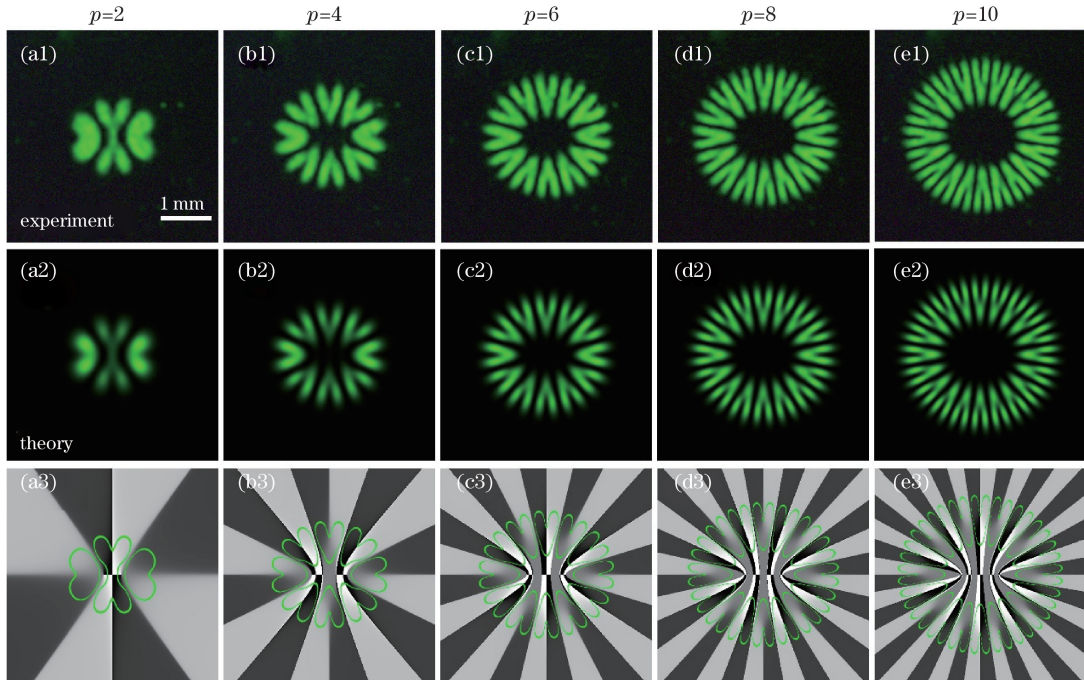


图 4 不同阶数 p 下 VIG_p 模式的光强分布和相位分布。(a1)~(e1)实验中产生的 VIG 模式光强分布;
(a2)~(e2)模拟的 VIG 模式光强分布;(a3)~(e3)模拟的 VIG 模式相位分布,绿色实线表示光强所在位置

Fig. 4 Intensity and phase distributions of VIG_p mode at different orders p .

(a1)-(e1) Experimental intensity distributions of VIG mode; (a2)-(e2) simulated intensity distributions of VIG mode;
(a3)-(e3) simulated phase distributions of VIG mode, the green solid line indicates the location of intensity

由 VIG 模式光强分布可以发现,每个 VIG 模式具有 $2p$ 数量的“V”字形光瓣。原因在于每个“V”字形光瓣本质上是 IG^e 模式的每一个光瓣与 IG^o 模式的每两个光瓣干涉而形成的,因此 VIG 模式“V”字形光瓣的数量等于 IG^e 光瓣的数量,即 $2p$ 。值得注意的是,VIG 模式的很多性质都保留着 IG 光束的性质,例如:奇偶模式空间不重合位置的光强分布以及光束的传输特性等。当 p 较小时,光瓣所在椭圆节点线的径向椭圆变量较小;当 $p=2$ 时,光束上下两边的“V”字形光瓣因距离太近而连接在了一起;随着 p 增大,各个“V”字形光瓣所在椭圆节点线逐渐增大。为了方便研究,本研究以理论模拟得到的奇、偶模光瓣最亮点所在椭圆节点线的径向椭圆变量的均值,近似代替 VIG 模式所在椭圆节点线的径向椭圆变量 Ξ ,选取不同的函数进行数据拟合。结果发现参数 p 与“V”字形光瓣所在椭圆节点线径向椭圆变量的关系为对数函数的关系: $\Xi=0.68+0.45\ln(p-0.83)$,相关系数为 0.9997。该关系为 VIG 模式的调控提供了数据支撑。此外,由图 4(a3)~(e3)中“V”字形光瓣内的相位分布可以看出,“V”字形光瓣所在位置的相位梯度较小(各个光瓣的平均相位梯度约为 0.04π),这就意味着波矢量近似为沿光轴方向。因此,当使用 VIG 模式进行微粒操纵时,在光轴截面上的力场分布主要为梯度力场。

研究中发现,随着参数 p 取值增大,奇偶模式光瓣所在椭圆节点线的间隔越来越大,而光瓣的大小

几乎不变,因此 p 必存在一个阈值 P ,当 $p>P$ 时,奇偶模式光瓣不符合所提出的径向空间位置条件,无法形成 VIG 模式。为了定量分析 VIG 模式的限制条件,使用数值模拟的方法进行研究。图 5(a)~(e)为探究 VIG 模式的径向空间位置条件。选取最大光强的 $1/5$ 为光瓣范围的阈值,则奇模光瓣径向椭圆变量 ξ 最小值所在椭圆节点线为图 5 中白色虚线所示;偶模光瓣的径向椭圆变量 ξ 最大值所在椭圆节点线为图 5 中红色虚线所示。只有白色椭圆节点线在红色椭圆节点线内时,偶模光瓣与奇模光瓣才有重叠部分,满足产生 VIG 的径向条件。模拟发现,当阶数小于 17 时,红色椭圆节点线在白色椭圆节点线外,奇偶模光瓣有重合部分;当参数为 17 时,红色椭圆节点线与白色椭圆节点线基本重合(径向椭圆参数相对误差为 0.36%),此时为产生 VIG 模式的临界点;当参数大于 17 时,红色椭圆节点线在白色椭圆节点线内,不能产生 VIG 模式。因此,VIG 模式的径向空间位置条件为 $p\leq 17$ 。

图 5(f)~(j)给出了 VIG 模式的角向光瓣数目条件。当奇、偶模参数相同时,光强分布在同一个椭圆节点线上,奇偶模光瓣以 1:1 配对时,形成螺旋 IG 光束^[23]。随着奇模参数增加,奇模光瓣与偶模光瓣所在椭圆节点线分离,且距离逐渐变大,奇、偶模角向光瓣失配。当奇模参数增加到偶模参数的两倍时,角向光瓣由失配转为偶奇模光瓣以 1:2 配对,构成所需要的 VIG 模式。该条件即为 VIG 模式的角向光瓣数目条件。

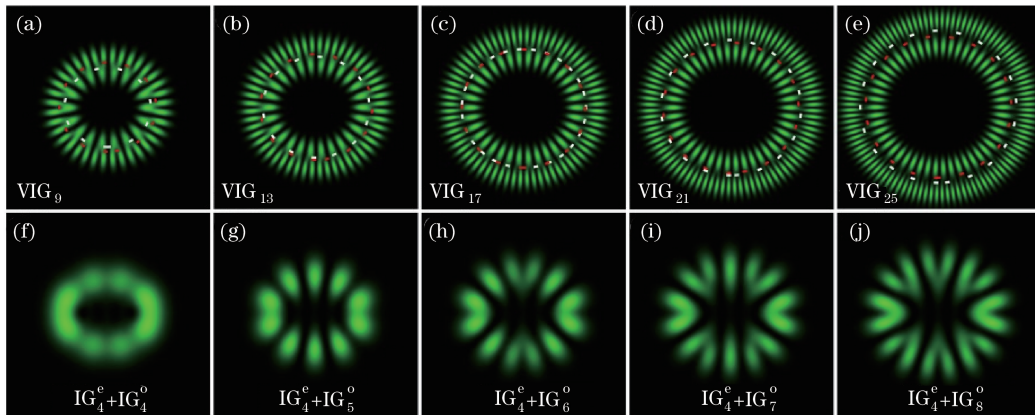


图 5 VIG 模式形成的限制条件

Fig. 5 Limiting condition of VIG mode generation

由于 VIG 模式是由 IG 奇偶模式叠加而成的,对改变奇偶模式初始相位差的 VIG 模式分布的研究具有重要意义。图 6 为向偶模施加一个初始相位后的 VIG 模式分布。其中图 6(a)~(l)为 $0\sim 2\pi$ 等间

隔取 12 个初始相位的 VIG 模式光强图;图 6(a1)~(l1)为相同参数的相位图,图中绿色实线为光强所在位置。可以看出,随着初始相位增加,每个“V”字形光瓣逐渐分裂为两个光瓣,最终在初始相位差为

$\pi/2$ 时形成两小两大光瓣相间的分布。其原因是 IG 光束的奇偶模式相位为黑白相间分布^[16], 因为奇模阶数是偶模阶数的两倍, 所以偶模相位周期为奇模相位周期的 50%, 偶模的一个黑色或白色条纹对应着奇模的一对黑白条纹。进而, 当偶模增加 $\pi/2$ 初始相位时, 每个 VIG 模式奇偶模干涉处因奇模相位不同而一处变亮一处变暗。例如图 6(d) 红色虚线左侧“V”字形偶模光瓣并入进了左边的奇模光瓣, 相位也耦合在了一起。当相邻两个“V”字形

光瓣奇模的相位分布相同时, 由于偶模相位不同, 两个 IG 模式干涉处的亮暗变化相反, 形成了一对短条纹和一对长条纹相间分布。随着初始相位差由 $\pi/2$ 变化到 π , 又重新形成了 VIG 模式。继续增加初始相位到 2π 的变化趋势类似, 不同的是每个 VIG 模式形成的长短条纹正好对调。其原因与 $0\sim\pi$ 的情况类似, 不再重复分析。此外, 对奇模增加初始相位的变化过程与对偶模增加初始相位的变化过程互逆^[23], 这里也不再重复分析。

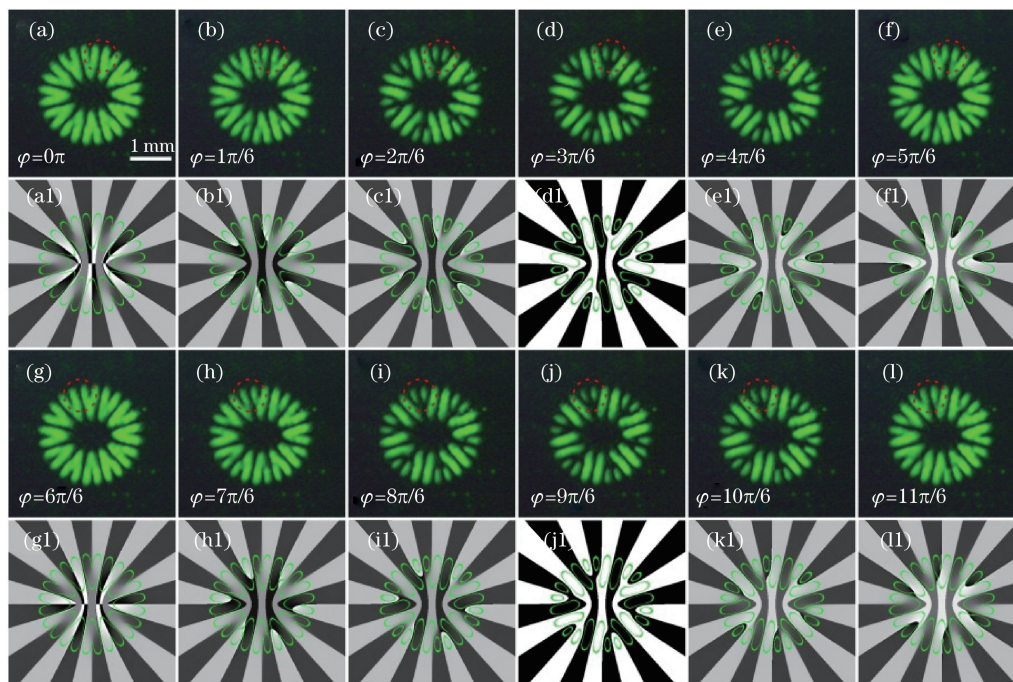


图 6 VIG_p^{±φ} 模式的强度和相位分布。(a)~(l)偶模添加初始相位后的 VIG 模式光强分布;
(a1)~(l1)偶模添加初始相位后的 VIG 模式相位分布, 绿色实线表示光强所在位置

Fig. 6 Intensity and phase distributions of VIG_p^{±φ} mode. (a)-(l) Intensity distributions of VIG mode after initial phase is added to even mode; (a1)-(l1) phase distributions of VIG mode after initial phase is added to even mode, the green solid line indicates the location of intensity

图 4 已经分析了 VIG 模式光轴截面上的力场主要为梯度力, 为论证 VIG 模式的应用价值, 下面主要研究其梯度力场分布。图 7 所示为参数 $p=4$, $\epsilon=2$ 时, 理论模拟的 VIG 模式的光强分布以及不考虑光束与粒子相互作用的梯度力场分布。如图 7 所示, 为了便于区分每个光瓣, 对其编号。图 7(b)~(j) 为梯度力场分布图, 背景图形为梯度力的大小, 箭头为梯度力的方向。整体来看, 只有分布在光束椭圆节点线长、短轴上的光瓣梯度力场呈轴对称分布, 如图 7(b)、图 7(d)、图 7(h) 和图 7(j) 所示。其原因在于 IG 光束不同光瓣的光强分布不均匀。由于光瓣越靠近光强分布椭圆节点线的长轴, 总光强越大^[29], 奇偶模式的光强分布关于椭圆节点线的

长、短轴对称。因此叠加后的 VIG 模式光强分布也关于长、短轴对称, 长、短轴上的“V”字形光瓣梯度力场呈轴对称分布, 光瓣 2、4、6、8 的力场分布也是相同的。下面以光瓣 2 为例, 依据其力场分布定性分析粒子运动的可能性。如果一个静止的粒子在“V”字形光瓣根部(光瓣右下角)被捕获到, 则由梯度力的指向可以发现粒子最终会优先被捕获到光瓣右上部分梯度力场的暗核处。只有当粒子指向左侧暗核有一个初始速度, 使粒子越过一定阈值时才能被左侧暗核捕获, 由于不同尺寸的粒子在微流运动中的惯性与受力不同, VIG 模式有望实现不同尺寸微粒的分选。此外, 如果粒子的初速度大于一定的阈值, 使得梯度力不足以改变

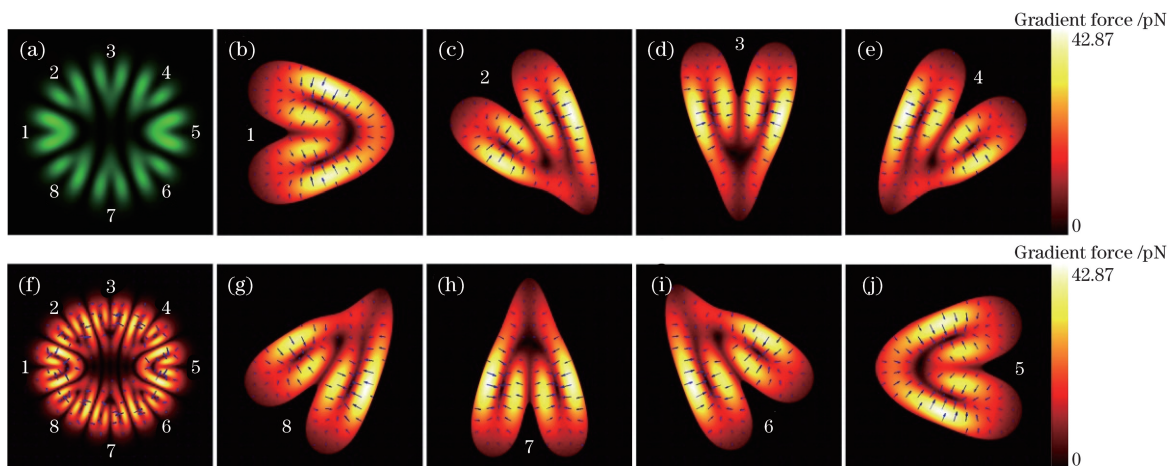


图 7 参数 $p=4$ 时 VIG 模式的梯度力。(a) 模拟的 VIG 模式光强分布;(f) VIG 模式的梯度力分布图;
(b~e)和(g~j)分别对应 8 个“V”字形光瓣的梯度力分布
Fig. 7 Gradient force of VIG mode with parameter $p=4$. (a) Simulated intensity distribution of VIG mode;
(f) gradient force distribution of VIG mode; (b~e) and (g~j) corresponding to the gradient force distribution
of the eight “V” shape light petals

粒子的运动方向,所有粒子均会朝左侧暗核运动。如果粒子的初速度沿着右上方向上的力场暗核,则所有粒子均会向右上方向运动,光瓣不再具有分选能力。

上述分析定性地给出了“V”字形光瓣应用于细胞分选的可行性。为了更精确地指导实际应用,利用参考文献[30]的方法,给出一个激光捕获力的数值范围。激光的捕获力可以表示为

$$F = \frac{QPIn}{c}, \quad (5)$$

式中: F 为全部的捕获力, N ; P_I 为微粒处的激光功率, W ; Q 为无量纲捕获效率,表示转移到被捕获物体上的入射光动量; c 为真空中的光速; n 为微粒周围介质的折射率。

若微粒周围的介质为水,可以估算一个 VIG 模式对微粒捕获力的范围。水的介质黏度为 1,在水

中 $10 \mu\text{m}$ 的微粒的最大横向捕获效率 Q 约为 $0.1934^{[31]}$,实验中所用 532 nm 连续波固体激光器的最大功率为 50 mW ,水对绿光的折射率约为 1.33 。利用(5)式计算得到 VIG 模式在水介质中对直径为 $10 \mu\text{m}$ 的微粒的最大捕获力 $F_{\text{max}}=42.87 \text{ pN}$ 。可以通过调节激光器输出功率来改变作用到微粒上的激光功率,从而根据实际需要调节 VIG 模式的捕获力在 $F_{\text{min}}=0 \text{ pN}$ 到 $F_{\text{max}}=42.87 \text{ pN}$ 之间变化。

图 8 所示分别为理论模拟与实验得到的 VIG 模式的梯度力分布。由图 8(b)可以看出,“V”字形光瓣的中间较暗而周围边缘处较亮,颜色越亮代表梯度力越大,蓝色箭头指向梯度力的方向。对比模拟结果和实验结果可以发现,实验产生的 VIG 模式具有与理论模拟一致的梯度力分布,可在光镊系统实验中实现操控微粒和细胞分选等工作。

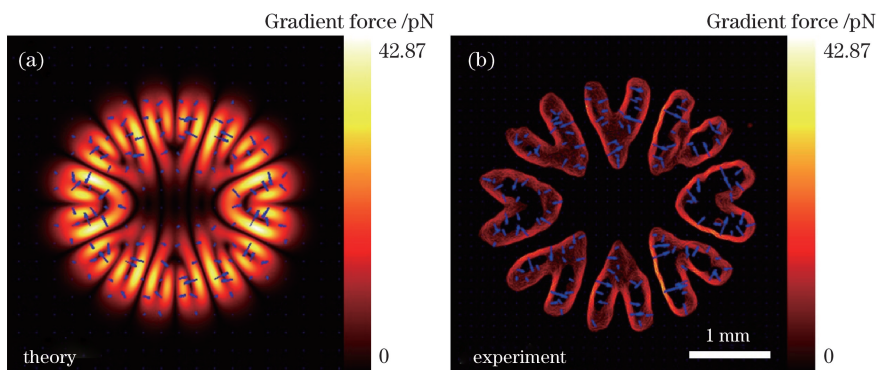


图 8 (a)模拟与(b)实验得到的 VIG 模式的梯度力分布
Fig. 8 Gradient force distributions of VIG mode obtained by (a) simulation and (b) experiment

为了研究的完整性,本课题组还对多个 IG 模式叠加的情况进行研究。图 9 为 IG_p^e 、 IG_{2p}^o 、 IG_{3p}^e 的叠加光强模式分布,(a1)~(e1)为实验图,(a2)~(e2)为理论模拟图。可以发现,这三种模式叠加可以生成类似于 VIG 模式的三个分支的模式,称为

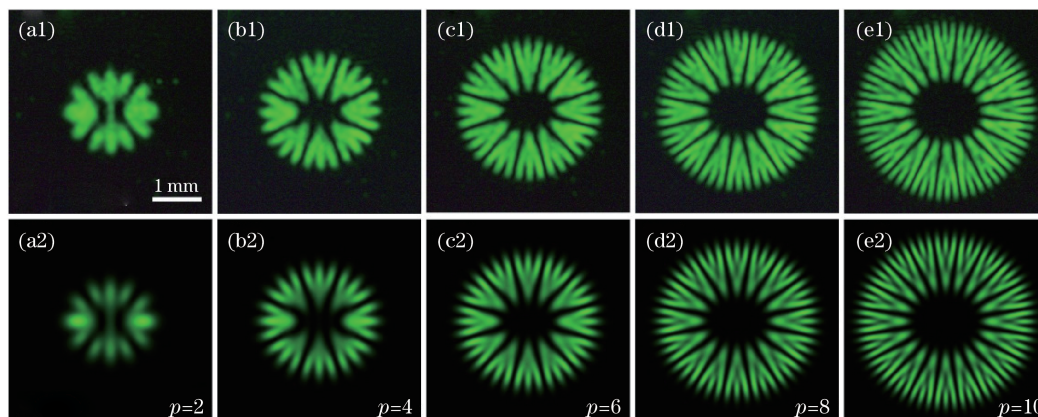


图 9 (a1)~(e1)实验得到的 3 分支 VIG 模式的光强分布;(a2)~(e2)模拟得到的 3 分支 VIG 模式的光强分布

Fig. 9 (a1)-(e1) Intensity distributions of three branches VIG mode obtained by experiment;
(a2)-(e2) intensity distributions of three branches VIG mode obtained by simulation

5 结 论

当 IG 光束的奇偶模式满足一定的角向光瓣数目条件(奇模参数数量为偶模参数数量的两倍)与径向空间位置条件(阶数 $p \leq 17$)时,可以干涉叠加生成一种每个光瓣均为“V”字形的 VIG 模式。“V”字形光瓣个数为 $2p$ 个,且分布于一个椭圆节点线上。该椭圆节点线的大小依赖于其参数 p 为一个对数函数的关系:节点线径向椭圆变量 $\Xi = 0.68 + 0.45 \ln(p - 0.83)$,相关系数为 0.9997。此外,通过调节奇偶模式的初始相位差,可以实现“V”字形光瓣向两大两小相间分布的分离光瓣模式连续转变,并可以实现大小光瓣空间位置的对调。通过力场分析定性证明了 VIG 模式具有应用于细胞分选的可能性,并且由于 VIG 模式是由计算全息法产生的,与传统使用两柱透镜聚焦两束激光生成“Y”字形光束的方法相比,显著简化了光路结构。扩展研究发现,使用 IG_p^e 、 IG_{2p}^o 、 IG_{3p}^e 这三种模式叠加可以产生三个分支的 VIG 模式。

参 考 文 献

- [1] Gao C Q, Qi X Q, Liu Y D, *et al.* Superposition of helical beams by using a Michelson interferometer[J]. Optics Express, 2010, 18(1): 72-78.
- [2] Wang F, Zhu S J, Cai Y J. Experimental study of the focusing properties of a Gaussian Schell-model vortex beam[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3281-3283.
- [3] Li X Z, Tai Y P, Li H H, *et al.* Properties study of the fractional order high order Bessel vortex beam using vector wave analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0605002.
李新忠, 台玉萍, 李贺贺, 等. 分数阶高阶贝塞尔涡旋光束的矢量波分析法研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0605002.
- [4] Li X Z, Meng Y, Li H H, *et al.* Generation of perfect vortex beams and space free-control technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1026018.
李新忠, 孟莹, 李贺贺, 等. 完美涡旋光束的产生及其空间自由调控技术[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026018.
- [5] Wang F, Chen Y H, Liu X L, *et al.* Self-reconstruction of partially coherent light beams scattered by opaque obstacles[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 23735-23746.
- [6] Yang Y J, Thirunavukkarasu G, Babiker M, *et al.* Orbital-angular-momentum mode selection by rotationally symmetric superposition of chiral states with application to electron vortex beams[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(9): 094802.
- [7] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons[J]. Nature Physics, 2007, 3(5): 305-310.
- [8] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810-816.
- [9] Tao S, Yuan X C, Lin J, *et al.* Fractional optical vortex beam induced rotation of particles[J]. Optics

- Express, 2005, 13(20): 7726-7731.
- [10] Bezryadina A S, Preece D C, Chen J C, *et al.* Optical disassembly of cellular clusters by tunable ‘tug-of-war’ tweezers[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5: e16158.
- [11] Liang Y S, Yao B L, Lei M, *et al.* Optical micro-manipulation based on spatial modulation of optical fields[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1026003. 梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026003.
- [12] Jia S, Vaughan J C, Zhuang X W. Isotropic three-dimensional super-resolution imaging with a self-bending point spread function[J]. Nature Photonics, 2014, 8(4): 302-306.
- [13] Crabtree K, Davis J A, Moreno I. Optical processing with vortex-producing lenses[J]. Applied Optics, 2004, 43(6): 1360-1367.
- [14] Li X Z, Tai Y P, Nie Z G. Digital speckle correlation method based on phase vortices[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7): 077004.
- [15] Zhang M M, Bai S C, Dong J. Advances in Ince-Gaussian modes laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020002. 张明明, 白胜闯, 董俊. Ince-Gaussian 模式激光的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020002.
- [16] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C. Ince-Gaussian beams[J]. Optics Letters, 2004, 29(2): 144-146.
- [17] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C. Ince-Gaussian modes of the paraxial wave equation and stable resonators[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2004, 21(5): 873-880.
- [18] Schwarz U T, Bandres M A, Gutierrez-Vega J C. Observation of Ince-Gaussian modes in stable resonators[J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1870-1872.
- [19] Bentley J B, Davis J A, Bandres M A, *et al.* Generation of helical Ince-Gaussian beams with a liquid-crystal display[J]. Optics Letters, 2006, 31(5): 649-651.
- [20] Chu S C, Yang C S, Otsuka K. Vortex array laser beam generation from a Dove prism-embedded unbalanced Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2008, 16(24): 19934-19949.
- [21] Woerdemann M, Alpmann C, Denz C. Optical assembly of microparticles into highly ordered structures using Ince-Gaussian beams[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(11): 111101.
- [22] Peng Y L, Chen B, Peng X, *et al.* Self-accelerating Airy-Ince-Gaussian and Airy-Helical-Ince-Gaussian light bullets in free space[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 18973-18985.
- [23] Ma H X, Li X Z, Li H H, *et al.* Spatial mode distributions of Ince-Gaussian beams modulated by phase difference factor[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0626002. 马海祥, 李新忠, 李贺贺, 等. 相位差因子调控的 Ince-Gaussian 光束空间模式分布[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0626002.
- [24] Fu A Y, Spence C, Scherer A, *et al.* A microfabricated fluorescence-activated cell sorter[J]. Nature Biotechnology, 1999, 17(11): 1109-1111.
- [25] MacDonald M P, Spalding G C, Dholakia K. Microfluidic sorting in an optical lattice[J]. Nature, 2003, 426(6965): 421-424.
- [26] Bañas A, Palima D, Villangca M, *et al.* Cell sorting using efficient light shaping approaches[J]. SPIE, 2016, 9764: 97640F.
- [27] Applegate R W, Jr, Squier J, Vestad T, *et al.* Microfluidic sorting system based on optical waveguide integration and diode laser bar trapping[J]. Lab on a Chip, 2006, 6(3): 422-426.
- [28] Ma B H, Yao B L, Peng F, *et al.* Optical sorting of particles by dual-channel line optical tweezers[J]. Journal of Optics, 2012, 14(10): 105702.
- [29] Zhen Z Q, Ma H X, Li X Z, *et al.* Intensity modes analysis of Ince-Gaussian light beam with lower degree[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 86-90. 甄志强, 马海祥, 李新忠, 等. 小级数 Ince-Gaussian 光束光强模式分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 86-90.
- [30] Ono M, Preece D, Duquette M L, *et al.* Mitotic tethers connect sister chromosomes and transmit “cross-polar” force during anaphase A of mitosis in PtK2 cells[J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(10): 4310-4315.
- [31] Khatibzadeh N, Stilgoe A B, Bui A A M, *et al.* Determination of motility forces on isolated chromosomes with laser tweezers[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6866.