

文章编号: 0258-7025(2009)08-2023-07

厄米-高斯涡旋光束形成的合成光涡旋及演化

何 德 闫红卫 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064)

摘要 对两束平行、离轴厄米-高斯(H-G)涡旋光束在束腰面形成的合成光涡旋(OV)及其演化特性做了研究。结果表明,合成光涡旋的数目、位置和净拓扑电荷不仅与控制参数,包括相对相位、振幅比、束腰宽度比和离轴参数有关,也与 H-G 涡旋光束的模式结构有关。适当改变控制参数和模式以及在自由空间演化中,会出现合成光涡旋的移动、产生和湮灭,并且拓扑电荷不总是守恒的。特别是,对 TEM_{00} 和 TEM_{01} 模涡旋光束形成的合成光涡旋,当改变相对相位时拓扑电荷也不守恒。所得结果对合成光涡旋的控制和应用是有用的。

关键词 合成光涡旋; 厄米-高斯涡旋光束; 模式结构; 拓扑电荷

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2023

Evolution and Composite Optical Vortices of Hermite-Gaussian Vortex Beams

He De Yan Hongwei Lü Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract The composite optical vortices (OVs) formed by two parallel, off-axis Hermite-Gaussian (H-G) vortex beams at the waist plane and their evolution behavior are studied. It is shown that the number, position and net topological charge of composite OVs depend not only on the control parameter, including the relative phase, amplitude ratio, waist width ratio and off-axis distance, but also on the mode structure of H-G vortex beams. By appropriately varying the control parameter and mode of H-G vortex beams and in the free-space evolution, the motion, creation and annihilation of composite vortices may appear, and the topological charge does not always remain unchanged. In particular, for the composite OVs formed by TEM_{00} and TEM_{01} vortex beams, the topological charge is not conserved by changing relative phase. The results are useful for the composite OV control and applications.

Key words composite optical vortex; Hermite-Gaussian vortex beam; mode structure; topological charge

1 引 言

奇点光学已发展成现代光学一个新的分支学科,并在微粒操控、光学扳手、光电子学、高分辨计量学和新型超分辨光学显微镜等多方面展现出广泛应用前景^[1]。对寄居于单束背景光,包括高斯光束、贝塞耳光束、拉盖尔-高斯光束和二次谐波光中的光涡旋(OV)及其演化特性以及可用于微粒操控的局域空心光束和部分相干空心涡旋光束等已做了许多理论和实验研究^[2~10]。另一方面,两束或多束平行、非共线

涡旋光束叠加时,在干涉场中形成的合成光涡旋的数目和位置都可能与原来涡旋光束有所不同。对合成光涡旋的研究,因在涡旋孤子、光扳手间的碰撞以及玻色-爱因斯坦凝聚形成的涡旋结构等方面有重要意义而引起重视^[11]。文献^[11~13]对两束高斯涡旋光束干涉形成的合成光涡旋及其特性已做了深入的理论和实验研究,指出合成光涡旋拓扑电荷不一定守恒。但当两束拓扑电荷 $l = \pm 1$ 的高斯涡旋光束合成时,原光束的拓扑电荷之和 l_{sum} 与合成光涡旋的净拓

收稿日期: 2008-10-06; 收到修改稿日期: 2008-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(10874125)资助项目。

作者简介: 何 德(1982-),女,硕士研究生,主要从事激光传输变换与奇点光学的研究。E-mail: 15644275@qq.com

导师简介: 吕百达(1943-),男,教授,博士生导师,主要从事高功率激光物理与技术,激光传输与控制 and 奇点光学新效应方面的研究。E-mail: baidalu0@tom.com (通信联系人)

扑电荷 l_{net} (定义净拓扑电荷 l_{net} 为合成光涡旋拓扑电荷之和) 相等, 即此时有 $l_{\text{sum}} = l_{\text{net}} = 0^{[13]}$ 。并且, 当拓扑电荷均为 $l = +1$ 的高斯涡旋光束合成时, 在自由空间传输中拓扑电荷守恒^[12]。我们对 $l = \pm 1$ 的两束离轴双曲余弦-高斯涡旋光束和两束平顶高斯涡旋光束干涉叠加形成的合成光涡旋及其在自由空间中的传输做了研究^[14,15], 发现改变控制参数, 包括振幅比、束腰宽度比、相对离轴参数等, 以及在自由空间中传输时, 拓扑电荷不一定守恒。但当改变相对相位时, 却始终有 $l_{\text{sum}} = l_{\text{net}} = 0$ 。

在合成光涡旋的控制, 包括合成光涡旋的数目、位置、产生和湮灭以及拓扑电荷变化等研究中, 一个值得探讨的问题是: 是否改变相对相位 β 时, 拓扑电荷守恒的结论除对高斯涡旋光束、双曲余弦-高斯涡旋光束和平顶高斯涡旋光束形成的合成光涡旋成立外, 对其他类型的涡旋光束也成立? 本文针对上述问题, 对两束平行、离轴 H-G 涡旋光束形成的合成光涡旋及其演化特性做了详细研究。结果表明, 不仅改变叠加 H-G 涡旋光束的控制参数所形成的合成光涡旋的数目和位置会发生变化, 而且当改变相对相位 β 时拓扑电荷也不总是守恒。

2 束腰面上合成光涡旋的特性

设两束离轴量分别为 $\pm s$ 的 H-G 涡旋光束在束腰面 $z=0$ 处的场分布为

$$E_1(x, y, 0) = E_{01} H_m \left[\frac{\sqrt{2}(x-s)}{\omega_1} \right] H_n \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_1} \right] \times \exp \left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{\omega_1^2} \right] [(x-s) + iy], \quad (1a)$$

$$E_2(x, y, 0) = E_{02} H_p \left[\frac{\sqrt{2}(x+s)}{\omega_2} \right] H_q \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_2} \right] \times \exp \left[-\frac{(x+s)^2 + y^2}{\omega_2^2} \right] [(x+s) - iy], \quad (1b)$$

式中 E_{01}, E_{02} 为振幅常数, ω_1, ω_2 为束腰宽度, $H_j(\cdot)$ 为 j 阶厄米多项式 ($j = m, n, p, q$)。式中已设两涡旋的拓扑电荷分别为 $+1, -1$, 因此总拓扑电荷 $l_{\text{sum}} = 0$ 。设 $E_1(x, y, 0), E_2(x, y, 0)$ 的相对相位为 β , 则合成光束的场为

$$E(x, y, 0) = E_1(x, y, 0) \exp(i\beta) + E_2(x, y, 0), \quad (2)$$

由光涡旋点必须满足条件^[1] $\begin{cases} \text{Re}[E(x, y, 0)] = 0 \\ \text{Im}[E(x, y, 0)] = 0 \end{cases}$, 得到合成光涡旋位置 (x, y) 满足的联立方程组为

$$\begin{cases} E_{01} H_m \left[\frac{\sqrt{2}(x-s)}{\omega_1} \right] H_n \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_1} \right] \exp \left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{\omega_1^2} \right] [(x-s) \cos \beta - y \sin \beta] + \\ E_{02} H_p \left[\frac{\sqrt{2}(x+s)}{\omega_2} \right] H_q \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_2} \right] \exp \left[-\frac{(x+s)^2 + y^2}{\omega_2^2} \right] (x+s) = 0, \\ E_{01} H_m \left[\frac{\sqrt{2}(x-s)}{\omega_1} \right] H_n \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_1} \right] \exp \left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{\omega_1^2} \right] [y \cos \beta + (x-s) \sin \beta] - \\ E_{02} H_p \left[\frac{\sqrt{2}(x+s)}{\omega_2} \right] H_q \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_2} \right] \exp \left[-\frac{(x+s)^2 + y^2}{\omega_2^2} \right] y = 0. \end{cases} \quad (3a)$$

$$\begin{cases} E_{01} H_m \left[\frac{\sqrt{2}(x-s)}{\omega_1} \right] H_n \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_1} \right] \exp \left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{\omega_1^2} \right] [(x-s) \cos \beta - y \sin \beta] + \\ E_{02} H_p \left[\frac{\sqrt{2}(x+s)}{\omega_2} \right] H_q \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_2} \right] \exp \left[-\frac{(x+s)^2 + y^2}{\omega_2^2} \right] (x+s) = 0, \\ E_{01} H_m \left[\frac{\sqrt{2}(x-s)}{\omega_1} \right] H_n \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_1} \right] \exp \left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{\omega_1^2} \right] [y \cos \beta + (x-s) \sin \beta] - \\ E_{02} H_p \left[\frac{\sqrt{2}(x+s)}{\omega_2} \right] H_q \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega_2} \right] \exp \left[-\frac{(x+s)^2 + y^2}{\omega_2^2} \right] y = 0. \end{cases} \quad (3b)$$

由(3a)和(3b)式可知, 合成光涡旋的位置、数目和净拓扑电荷与控制参数, 包括相对相位 β , 振幅比 $\eta = E_{01}/E_{02}$, 束腰宽度比 $\mu = \omega_1/\omega_2$, 离轴参数 s 有关, 并且与叠加的 H-G 涡旋光束的模式结构 TEM_{mn} 和 TEM_{pq} 也有关。

2.1 合成光涡旋随相对相位 β 的变化

由(2)和(3)式得出 TEM_{00} 和 TEM_{01} 模涡旋光束形成的合成光涡旋随相对相位 β 的变化见图1(a)和(b), 实心圆表示 $l = +1$, 空心圆表示 $l = -1$ (下同), 图1(b)右侧小图为局部放大图。计算参数为 $\eta = 0.4$, $\omega_1 = 1 \text{ mm}$, $\omega_2 = 1 \text{ mm}$, $s = 0.7 \text{ mm}$ 。从图1可以看出有5个临界值 $\beta_{c1} = -\pi$, $\beta_{c2} = 0$, $\beta_{c3} =$

0.25π , $\beta_{c4} = 0.75\pi$, $\beta_{c5} = \pi$ 。当 $\beta = \beta_{c1}$ 时, 有2个合成光涡旋 a 和 b , 其拓扑电荷按文献[1]方法分析知分别为 $+1, -1$, 此时 $l_{\text{net}} = 0$ 。随着相对相位 β 增加, a 保持位置不变, 同时出现 $l = -1$ 的合成光涡旋 c , c 向 a 靠近, b 远离 a , 此时共有3个合成光涡旋 a, b, c , 且 $l_{\text{net}} = -1$; 当 $\beta = \beta_{c2}$ 时, b 移动到无穷远, $l_{\text{sum}} = l_{\text{net}} = 0$; 随 β 进一步增加, 将出现1个 $l = +1$ 的合成光涡旋 d , d 向 a 靠近, 此时共有3个合成光涡旋 a, c, d , 且 $l_{\text{net}} = +1$; 当 $\beta = \beta_{c3}$ 时, a 与 c 湮灭, 只剩下 d , $l_{\text{net}} = +1$ 。随 β 继续增加, 仍会不断出现合成光涡旋的移动、产生和湮灭现象。在整个过程中除 $\beta_{c1}, \beta_{c2}, \beta_{c5}$ 3个临界值处拓扑电荷守恒

$l_{\text{sum}}=l_{\text{net}}=0$ 外,其他情况拓扑电荷均不守恒。由此可知,当改变相对相位 β 时,拓扑电荷守恒的结论并不普遍成立。但对 TEM_{10} 和 TEM_{01} 模 H-G

涡旋光束形成的合成光涡旋的研究表明,此时改变 β 时,却始终有 $l_{\text{sum}}=l_{\text{net}}=0$ (为节省篇幅略去计算结果)。

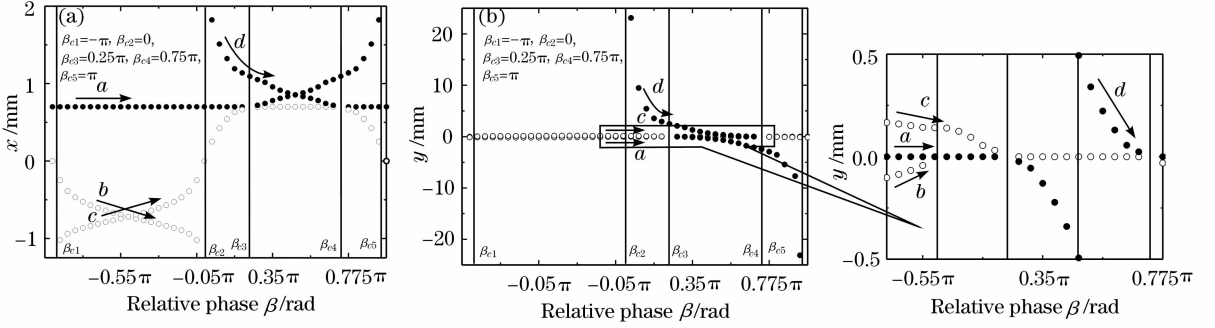


图1 在束腰面 $z=0$ 合成光涡旋的位置随相对相位 β 的变化。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig.1 Position of composite OVs at the waist plane $z=0$ versus relative phase β in the x direction (a) and y direction (b)

2.2 合成光涡旋随振幅比 η 的变化

在以下的分析中,设合成光涡旋由 TEM_{10} 和 TEM_{01} 模涡旋光束相干叠加而成。

当 $\beta=0$ 时

$$y=0, x=s, \quad (4a)$$

$$x=0 \text{ 时}, \eta = \frac{-\mu y}{s} \frac{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\omega_2^2}\right)}{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\mu^2 \omega_2^2}\right)}, \quad (4b)$$

当 $\beta=\pi$ 时

$$y=0, x=s, \quad (4c)$$

$$x=0 \text{ 时}, \eta = \frac{\mu y}{s} \frac{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\omega_2^2}\right)}{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\mu^2 \omega_2^2}\right)}. \quad (4d)$$

TEM_{10} 和 TEM_{01} 模涡旋光束形成合成光涡旋位置 x, y 随振幅比 η 的变化如图 2 所示,计算参数为 $\omega_1=1 \text{ mm}$, $\omega_2=0.8 \text{ mm}$, $s=0.7 \text{ mm}$ 。由图 2 可以看出 η 的临界值为 $\eta_c=0.78$, $\eta < \eta_c$ 时有 3 个光涡旋 $l_{\text{net}}=+1$, 当 $\eta=\eta_c$ 时,拓扑电荷为 $l=+1$ 和 $l=-1$ 的两个光涡旋湮灭,当 $\eta > \eta_c$ 时只有一个光涡旋 $l_{\text{net}}=+1$,整个过程拓扑电荷不守恒, $l_{\text{net}}=+1$ 。

2.3 合成光涡旋随束腰宽度比 μ 的变化

当 $\beta=0$ 时

$$y=0, x=s, \quad (5a)$$

$$x=0, \mu = \frac{-\eta s \exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\mu^2 \omega_2^2}\right)}{y \exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\omega_2^2}\right)}, \quad (5b)$$

当 $\beta=\pi$ 时

$$y=0, x=s, \quad (5c)$$

$$x=0 \text{ 时}, \mu = \frac{\eta s \exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\mu^2 \omega_2^2}\right)}{y \exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\omega_2^2}\right)}. \quad (5d)$$

TEM_{10} 和 TEM_{01} 模涡旋光束形成合成光涡旋位置 x, y 随束腰宽度比 μ 的变化关系如图 3 所示,计算参数为 $\eta=0.4$, $\omega_2=1 \text{ mm}$, $s=0.7 \text{ mm}$, 临界值 $\mu_c=1$ 。由图 3 知,当 $\mu \leq \mu_c$ 时,有 2 个拓扑电荷为 $l_{1,2}=+1, -1$ 的光涡旋, $l_{\text{net}}=0$ 。 $\mu > \mu_c$ 时有 3 个拓扑电荷为 $l_{1,2,3}=+1, -1, +1$ 的光涡旋, $l_{\text{net}}=+1$ 。整个过程拓扑电荷并不一直守恒。

2.4 合成光涡旋随离轴参数 s 的变化

当 $\beta=0$ 时

$$y=0, x=s, \quad (6a)$$

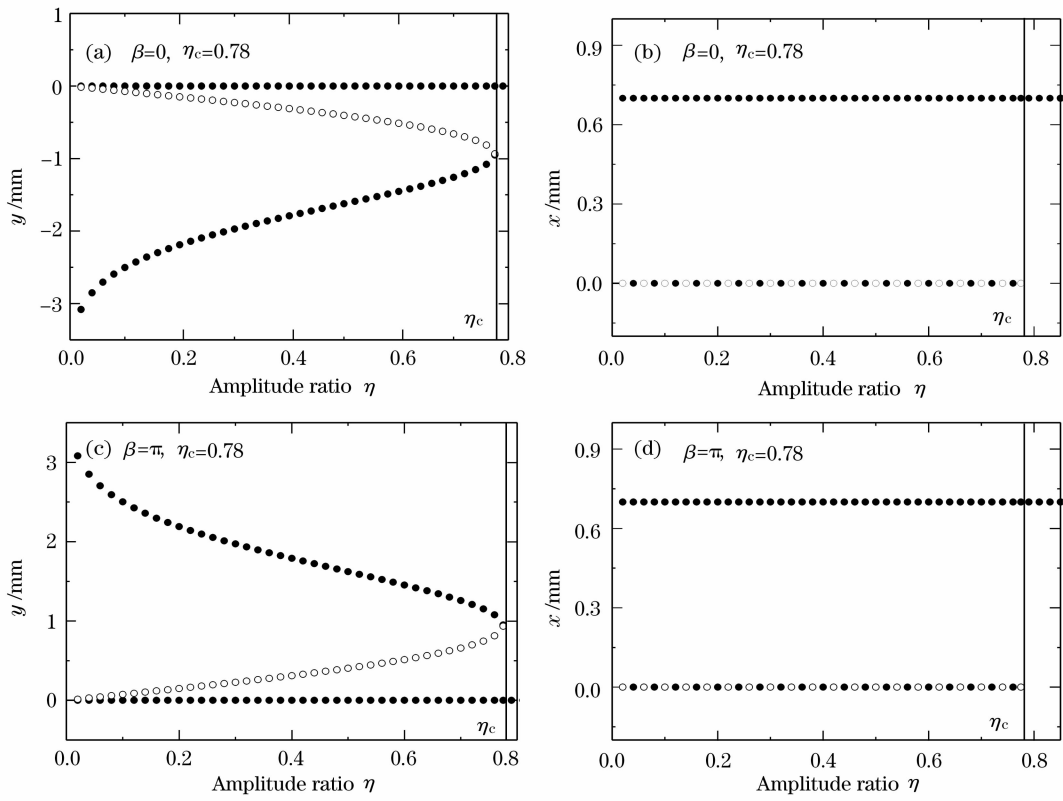
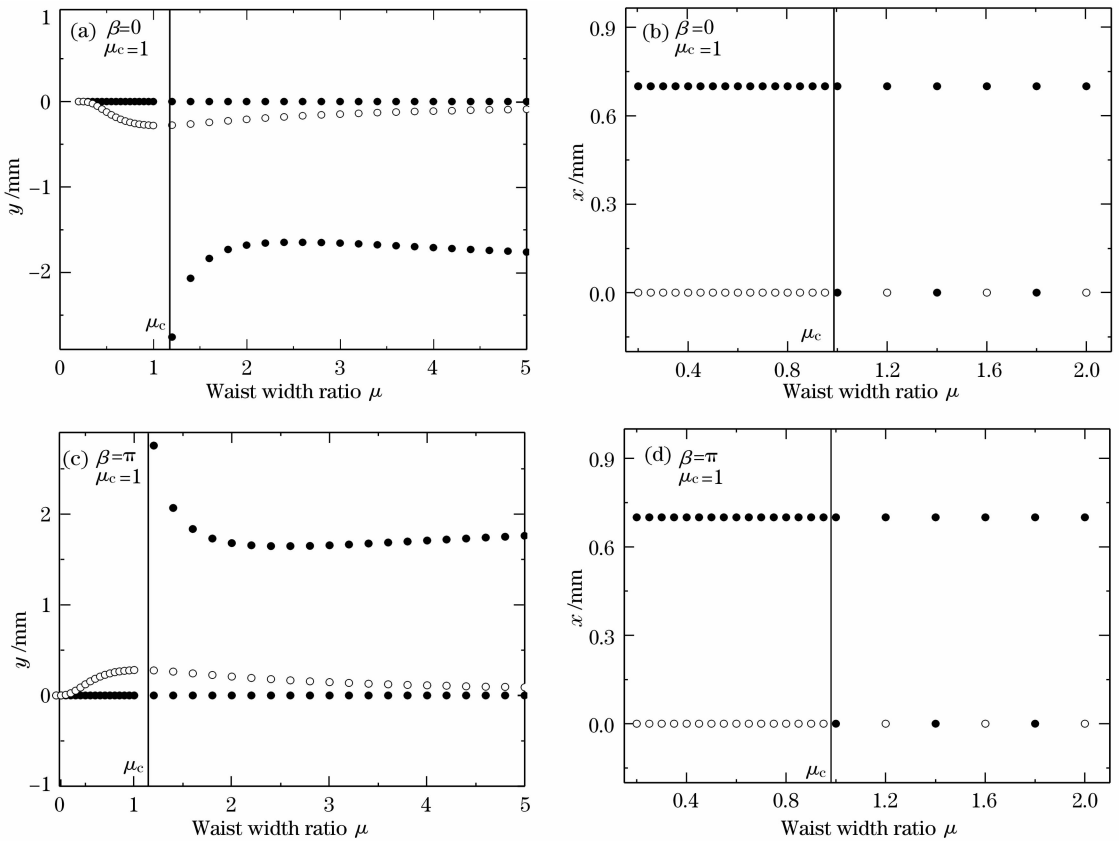
$$x=0 \text{ 时}, s = \frac{-\mu y}{\eta} \frac{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\omega_2^2}\right)}{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\mu^2 \omega_2^2}\right)}, \quad (6b)$$

当 $\beta=\pi$ 时

$$y=0, x=s, \quad (6c)$$

$$x=0 \text{ 时}, s = \frac{\mu y}{\eta} \frac{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\omega_2^2}\right)}{\exp\left(\frac{-s^2-y^2}{\mu^2 \omega_2^2}\right)}. \quad (6d)$$

TEM_{10} 和 TEM_{01} 模涡旋光束形成合成光涡旋位置 x, y 随离轴参数 s 的变化关系如图 4 所示,计算参数为 $\eta=0.4$, $\omega_1=1 \text{ mm}$, $\omega_2=0.8 \text{ mm}$, 临界值 $s_c=1 \text{ mm}$ 。图 4 说明,当 $s < s_c$ 时,有 3 个拓扑电荷为 $l_{1,2,3}=+1, -1, +1$ 的光涡旋, $l_{\text{net}}=+1$ 。当 $s \geq s_c$ 时有一个拓扑电荷为 $l=+1$ 的光涡旋, $l_{\text{net}}=+1$ 。整个过程拓扑电荷不守恒, $l_{\text{net}}=+1$ 。

图 2 在束腰面 $z=0$ 合成光涡旋的位置随振幅比 η 的变化Fig. 2 Position of composite OVs at the waist plane $z=0$ versus amplitude ratio η 图 3 在束腰面 $z=0$ 合成光涡旋的位置随束腰宽度比 μ 的变化Fig. 3 Position of composite OVs at the waist plane $z=0$ versus waist width ratio μ

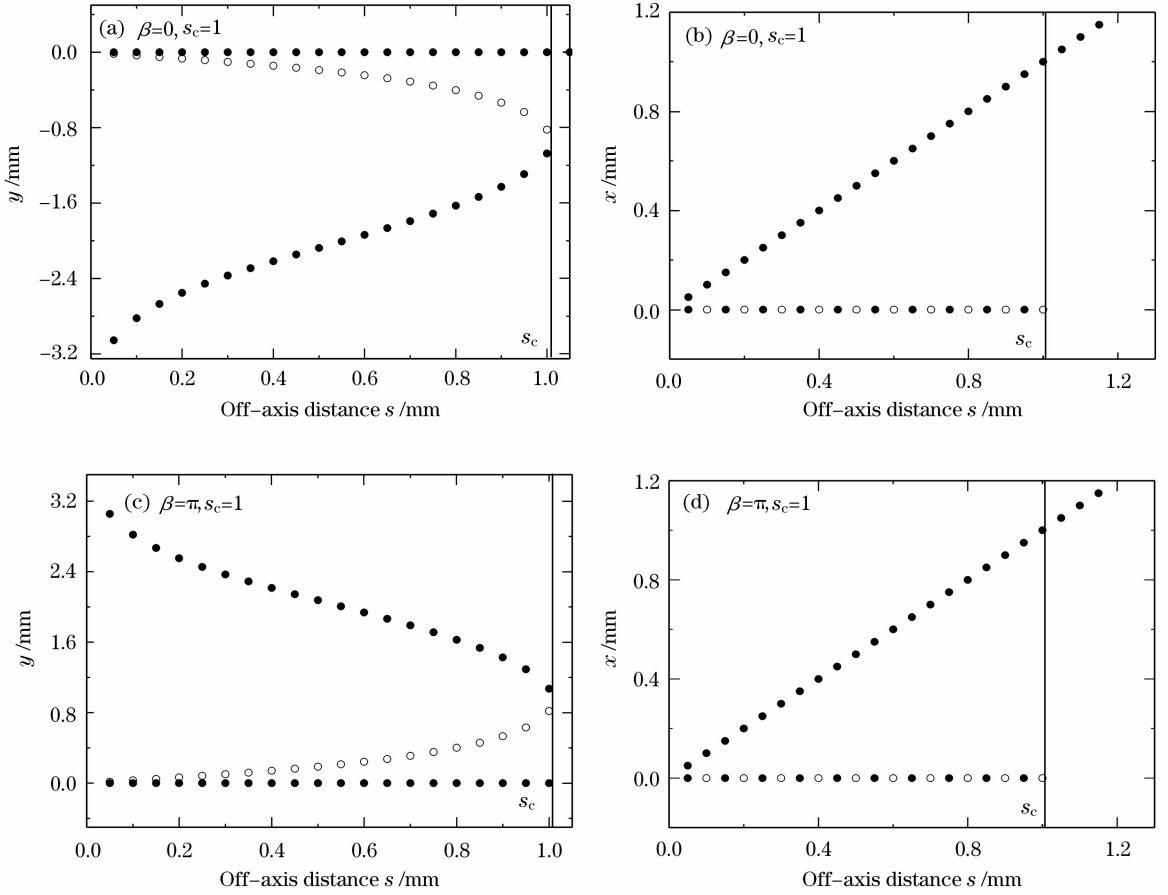


图 4 在束腰面 $z=0$ 合成光涡旋的位置随离轴参数 s 的变化

Fig. 4 Position of composite OV's at the waist plane $z=0$ versus off-axis distance s

3 合成光涡旋在自由空间中的变化特性

将(2)式代入菲涅耳衍射积分公式,积分后得

$$E_2(x', y', z) = C_1 + iC_2 + C_3 - iC_4, \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned}
 C_1 = & \frac{2iE_{02}\eta\omega_0 \exp(ikz)}{-\lambda k\xi} \left(\frac{\pi}{1-i/\xi} \right) \exp \left[\frac{i}{\xi} (x'^2 + y'^2) - \frac{i}{\xi} (2\alpha x' - \sigma^2) \right] \exp(i\beta) \times \\
 & \sum_{k_m=0}^{[m/2]} \sum_{k_n=0}^{[n/2]} \frac{(-1)^{k_m+k_n} m! n!}{k_m! k_n!} (2\sqrt{2})^{m+n-2(k_m+k_n)} (m-2k_m+1) \times \\
 & \exp \left\{ \frac{\left[\frac{i}{\xi} (\sigma - x') \right]^2 + \left(-\frac{i}{\xi} y' \right)^2}{1 - \frac{i}{\xi}} \right\} \left[\frac{i}{\xi} (\sigma - x') \right]^{m-2k_m+1} \left[\frac{-i}{\xi} y' \right]^{n-2k_n} \times \\
 & \sum_{k_{mm}=0}^{[m-2k_m+1/2]} \sum_{k_{nn}=0}^{[n-2k_n/2]} \frac{\left\{ 1 - \frac{i}{\xi} / 4 \left[\frac{i}{\xi} (\sigma - x') \right]^2 \right\}^{k_{mm}} \left[1 - \frac{i}{\xi} / 4 \left(-\frac{i}{\xi} y' \right)^2 \right]^{k_{nn}}}{k_{mm}! k_{nn}! (m-2k_m+1-2k_{mm})! (n-2k_n-2k_{nn})!}, \quad (8a) \\
 C_2 = & \frac{2iE_{02}\eta\omega_0 \exp(ikz)}{-\lambda k\xi} \left(\frac{\pi}{1-i/\xi} \right) \exp \left[\frac{i}{\xi} (x'^2 + y'^2) - \frac{i}{\xi} (2\alpha x' - \sigma^2) \right] \exp(i\beta) \times \\
 & \sum_{k_m=0}^{[m/2]} \sum_{k_n=0}^{[n/2]} \frac{(-1)^{k_m+k_n} m! n!}{k_m! k_n!} (2\sqrt{2})^{m+n-2(k_m+k_n)} (n-2k_n+1) \times
 \end{aligned}$$

$$\exp\left\{\frac{\left[\frac{i}{\xi}(\sigma-x')\right]^2 + \left(-\frac{i}{\xi}y'\right)^2}{1-\frac{i}{\xi}}\right\} \left[\frac{i}{\xi}(\sigma-x')\right]^{m-2k_m} \left[\frac{-\frac{i}{\xi}y'}{1-\frac{i}{\xi}}\right]^{n-2k_n+1} \times$$

$$\sum_{k_{mm}=0}^{[m-2k_m/2]} \sum_{k_{nn}=0}^{[n-2k_n+1/2]} \frac{\left\{\left(1-\frac{i}{\xi}\right)/\left\{4\left[\frac{i}{\xi}(\sigma-x')\right]^2\right\}\right\}^{k_{mm}} \left\{\left(1-\frac{i}{\xi}\right)/\left[4\left(-\frac{i}{\xi}y'\right)^2\right]\right\}^{k_{nn}}}{k_{mm}!k_{nn}!(m-2k_m-2k_{mm})!(n-2k_n+1-2k_{nn})!}, \quad (8b)$$

$$C_3 = \frac{2i\omega_0 \exp(ikz)}{-\lambda k \xi} \left(\frac{\pi}{1-i/\xi}\right) \exp\left[\frac{i}{\xi}(x'^2+y'^2) + \frac{i}{\xi}(\sigma^2+2\sigma x')\right] \times$$

$$\sum_{k_p=0}^{[p/2]} \sum_{k_q=0}^{[q/2]} \frac{(-1)^{k_p+k_q} p!q!}{k_p!k_q!} (2\sqrt{2})^{p+q-2(k_p+k_q)} (p-2k_p+1) \times$$

$$\exp\left\{\frac{\left[\frac{i}{\xi}(-\sigma-x')\right]^2 + \left(-\frac{i}{\xi}y'\right)^2}{1-\frac{i}{\xi}}\right\} \left[\frac{i}{\xi}(-\sigma-x')\right]^{p-2k_p+1} \left[\frac{-\frac{i}{\xi}y'}{1-\frac{i}{\xi}}\right]^{q-2k_q} \times$$

$$\sum_{k_{pp}=0}^{[p-2k_p+1/2]} \sum_{k_{qq}=0}^{[q-2k_q/2]} \frac{\left\{\left(1-\frac{i}{\xi}\right)/\left\{4\left[\frac{i}{\xi}(-\sigma-x')\right]^2\right\}\right\}^{k_{pp}} \left\{\left(1-\frac{i}{\xi}\right)/\left[4\left(-\frac{i}{\xi}y'\right)^2\right]\right\}^{k_{qq}}}{k_{pp}!k_{qq}!(p-2k_p+1-2k_{pp})!(q-2k_q-2k_{qq})!}, \quad (8c)$$

$$C_4 = \frac{2i\omega_0 \exp(ikz)}{-\lambda k \xi} \left(\frac{\pi}{1-i/\xi}\right) \exp\left[\frac{i}{\xi}(x'^2+y'^2) + \frac{i}{\xi}(\sigma^2+2\sigma x')\right] \times$$

$$\sum_{k_p=0}^{[p/2]} \sum_{k_q=0}^{[q/2]} \frac{(-1)^{k_p+k_q} p!q!}{k_p!k_q!} (2\sqrt{2})^{p+q-2(k_p+k_q)} (q-2k_q+1) \times$$

$$\exp\left\{\frac{\left[\frac{i}{\xi}(-\sigma-x')\right]^2 + \left(-\frac{i}{\xi}y'\right)^2}{1-\frac{i}{\xi}}\right\} \left[\frac{i}{\xi}(-\sigma-x')\right]^{p-2k_p} \left[\frac{-\frac{i}{\xi}y'}{1-\frac{i}{\xi}}\right]^{q-2k_q+1} \times$$

$$\sum_{k_{pp}=0}^{[p-2k_p/2]} \sum_{k_{qq}=0}^{[q-2k_q+1/2]} \frac{\left\{\left(1-\frac{i}{\xi}\right)/\left\{4\left[\frac{i}{\xi}(-\sigma-x')\right]^2\right\}\right\}^{k_{pp}} \left\{\left(1-\frac{i}{\xi}\right)/\left[4\left(-\frac{i}{\xi}y'\right)^2\right]\right\}^{k_{qq}}}{k_{pp}!k_{qq}!(p-2k_p-2k_{pp})!(q-2k_q+1-2k_{qq})!}, \quad (8d)$$

$$x' = x_2/\omega_0, y' = y_2/\omega_0, \sigma = s/\omega_0, k = 2\pi/\lambda, \xi = z/z_R, z_R = k\omega_0^2/2, \quad (9)$$

且已设 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$, 其中 z_R 为瑞利长度。

由(7)式得出当 $m=1, n=0, p=0, q=1$ 时, 由 TEM_{10} 和 TEM_{01} 模形成合成光涡旋的位置随相对传输距离 $\xi = z/z_R$ 的变化见图 5(a) 和 (b), 计算参数为 $\beta=0, \sigma=0.7, \eta=0.4$ 。图 5 表明, 在自由空间传输时伴随有合成光涡旋的产生和移动。例如, 当 $\xi=0$ 时, 有两个拓扑电荷为 $l_{1,2} = +1, -1$ 的合成光涡旋, $l_{net} = 0$, 在沿着 z 轴传输的过程中, 这两个合成光涡旋始终存在, 并且有相互远离的趋势。同时, 传输过程中还依次出现拓扑电荷为 $l_{3,4,5} = -1, +1, -1$ 的 3 个合成光涡旋, 因此拓扑电荷在传输过程中并不总是守恒。

4 结 论

对两束平行、离轴 H-G 涡旋光束在束腰面干涉叠加形成的合成光涡旋及其在自由空间中的演化特性做了详细研究。与文献[13~15]中背景光束为高斯光束、双曲余弦高斯光束和平顶高斯光束不同的是, 本文背景光为 H-G 光束。研究结果表明, 除控制参数, 包括相对相位 β , 振幅比 η , 束腰宽度比 μ 以及离轴参数 s 对合成光涡旋有影响外, H-G 涡旋光束模式结构对合成光涡旋也有影响。适当改变控制参数和 H-G 涡旋光束模式结构, 以及在自由空间演化中, 合成光涡旋的数目和位置会发生变化, 即出现合成光涡旋的移动、产生和湮灭现象, 并且拓扑电荷

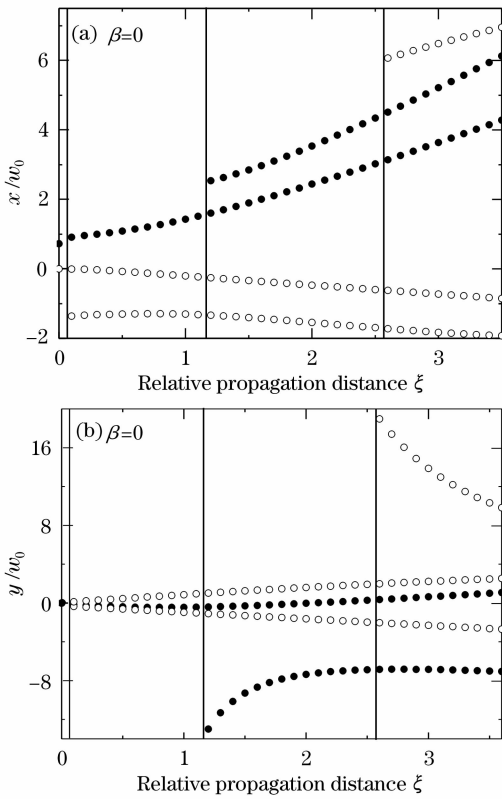


图 5 合成光涡旋位置随相对传输距离 ξ 的变化

(a) x/w_0 方向; (b) y/w_0 方向

Fig. 5 Position of composite OVs versus relative propagation distance ξ . In the x/w_0 direction (a) and in the y/w_0 direction (b)

不总是守恒。对 TEM_{00} 和 TEM_{01} 模涡旋光束形成的合成光涡旋,当改变相对相位 β 时,拓扑电荷也不守恒,而在文献[13~15]中改变 β 时,拓扑电荷是守恒的。因此,在干涉叠加场中形成的合成光涡旋的确有更为丰富的物理内涵,而且文献[11]中指出的对合成光涡旋拓扑电荷不满足简单的算术关系,即拓扑电荷不守恒是更为普遍的规律,从而深化了对合成光涡旋的认识,所得结果对合成光涡旋的控制和应用有实际意义。

参 考 文 献

- 1 M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov. Singular optics[J]. *Progress in Optics*, 2001, **42**:219~276
- 2 G. Indebetouw. Optical vortices and their propagation[J]. *J. Mod. Opt.*, 1993, **40**:73~87
- 3 G. Molina-Terriza, J. Recolons, J. P. Torres *et al.*. Observation of the dynamical inversion of the topological charge of an optical vortex[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**:023902
- 4 U. T. Schwarz, S. Sogomonian, M. Maier. Propagation dynamics of phase dislocations embedded in a Bessel light beam [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**:255~262
- 5 S. Orlov, K. Regelskis, V. Smilgevicus *et al.*. Propagation of Bessel beams carrying optical vortices[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **209**:155~165
- 6 S. Orlov, A. Stabinis. Free-space propagation of light field created by Bessel-Gaussian and Laguerre-Gaussian singular beams [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**:97~105
- 7 S. Orlov, K. Regelskis, V. Smilgevicus *et al.*. Free-space propagation on second harmonic Laguerre-Gaussian beams carrying phase singularity[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, **6**:S255~258
- 8 Xue Dongmei, Liu Tingting, Guo Chengshan. Localized hollow beams generated through interference of double zero-order Bessel beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):771~775
薛冬梅, 刘婷婷, 国承山. 基于零级贝塞尔光束干涉产生的局域空心光束[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5):771~775
- 9 Zhang Zhiming, Pu Jixiong, Wang Xiqing. Focusing of cylindrically polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):401~405
张志明, 蒲继雄, 王喜庆. 圆柱偏振贝塞尔-高斯光束经高数值孔径透镜的聚焦[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):401~405
- 10 Lianzhou Rao, Jixiong Pu. Generation of partially coherent vortex bottle beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(05):379~382
- 11 G. Molina-Terriza, J. Recolons, L. Torner. The curious arithmetic of optical vortices[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**:1135~1137
- 12 V. Pyragaite, A. Stabinis. Free-space propagation of overlapping light vortex beams[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **213**:187~191
- 13 I. D. Maleev, G. A. Swartzlander, Jr.. Composite optical vortices[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**:1169~1176
- 14 Yan Hongwei, Cheng Ke, Lü Baida. Composite optical vortices formed by two flattened Gaussian vortex beams and their propagation properties in free space[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**:5542~5549
闫红卫, 程 科, 吕百达. 离轴平顶高斯涡旋光束形成的合成光涡旋及其在自由空间中的传输[J]. *物理学报*, 2008, **57**:5542~5549
- 15 Yan Hongwei, Cheng Ke, Lü Baida. Composite optical vortices in two noncollinear cosh-Gaussian vortex beams and their propagation properties in free space [J]. *Opt. Laser Tech.*, 2008, **40**:967~977