

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^{*}

闫红卫 程 科 吕百达[†]

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)
(2007 年 11 月 29 日收到, 2008 年 1 月 21 日收到修改稿)

对两束拓扑电荷 $m_{1,2} = \pm 1$ 的平行、离轴平顶高斯涡旋光束在束腰面叠加形成的合成光涡旋及其在自由空间的传输做了研究. 详细的数值计算和分析表明, 合成光涡旋的位置、数目和净拓扑电荷与光束的控制参数, 包括相对位相、振幅比、束腰宽度比、相对离轴参数、光束阶数, 以及传输距离有关, 但拓扑电荷不总是守恒.

关键词: 奇点光学, 合成光涡旋, 平顶高斯涡旋光束, 拓扑电荷

PACC: 4225

1. 引 言

在光场振幅为零值的点, 位相变得不确定, 对具有位相奇异特性光束的研究不仅具有理论上的重要意义, 而且在原子俘获、微粒操控、光数据存储和高分辨计量学等多方面有潜在应用, 已发展成现代光学前沿之一——奇点光学^[1]. 对寄居于高斯光束、贝塞尔光束、拉盖尔高斯光束和二次谐波光中的光涡旋及其传输特性已做了详细的研究^[2-10]. 当两束或多束平行、离轴的涡旋光束干涉时, 形成合成光涡旋. Pyragaite 等人^[11]研究了两束拓扑电荷均为 +1 的离轴高斯涡旋光束叠加形成的合成光涡旋在自由空间中的传输特性. Maleev 等人^[12]研究了在束腰面的两束离轴高斯涡旋光束形成的合成光涡旋的特性. 这些研究工作都是针对离轴高斯涡旋光束干涉叠加形成的合成光涡旋进行的. 值得进一步研究的问题是对其他类型或更有广泛代表意义的光涡旋光束叠加形成的合成光涡旋有什么特性? 文献 [11, 12] 得出的结论是否具有一般性? 众所周知, 平顶高斯光束^[13]是一类描述光强为平顶分布光束的数学物理模型, 高斯光束可作为其阶数为零的特例. 本文对两束平行、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动态传输做了详细研究, 并与文献 [11, 12] 结果的异同做了比较分析. 所得结

果对认识合成光涡旋的变化规律和对合成光涡旋的控制有意义.

2. 束腰面合成光涡旋的特性

拓扑电荷为 m_i 的平顶高斯涡旋光束在束腰 $z = 0$ 面的场分布为^[13, 14]

$$E_i(x, y, 0) = E_{0i} \exp\left[-\frac{(N+1)x^2}{w_{0i}^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)x^2}{w_{0i}^2}\right]^n \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{0i}^2}\right] \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{0i}^2}\right]^l \times [x + i \operatorname{sgn}(m_i)y]^{m_i},$$

($i = 1, 2, \dots$ 下同), (1)

式中 E_{0i} 为振幅常数, w_{0i} 为束腰宽度, N 是平顶高斯光束的阶数 ($N = 0, 1, 2, \dots$), m_i 为拓扑电荷, $\operatorname{sgn}(m_i)$ 为符号函数, $m_i > 0$ 时, 为 +1, $m_i < 0$ 时, 为 -1.

两束拓扑电荷为 $m_{1,2} = \pm 1$ (拓扑电荷之和 $m_{\text{sum}} = 0$), 中心位于 x 轴, 离轴量分别为 $\pm s$ ($s > 0$), 相对位相为 β 的平顶高斯涡旋光束在 $z = 0$ 面的合

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 30574097)资助的课题.

[†] E-mail: yanhongwei0416@163.com (H. Yan), haidalu0@tom.com (B. Liu)

成光束场分布为

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

将(1)式代入(2)式得到

$$\begin{aligned} E(x, y, \rho) = & E_{01} \exp\left[-\frac{(N+1)(x-s)^2}{w_{01}^2}\right] \\ & \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x-s)^2}{w_{01}^2}\right]^n \\ & \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{01}^2}\right] \\ & \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{01}^2}\right]^l (x-s+iy) \\ & + E_{02} \exp\left[-\frac{(N+1)(x+s)^2}{w_{02}^2}\right] \\ & \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x+s)^2}{w_{02}^2}\right]^n \\ & \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{02}^2}\right] \\ & \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{02}^2}\right]^l \\ & \times (x+s-iy). \end{aligned} \quad (3)$$

由光涡旋点必须满足 $\operatorname{Re}[E(x, y, 0)] = 0$ 和 $\operatorname{Im}[E(x, y, 0)] = 0$ 条件^[15], 以及(3)式得到合成光涡旋位置 (x, y) 满足方程组为

$$\begin{aligned} & \mu \exp\left[-(N+1)\left(\frac{x}{w_{01}} - \sigma_1\right)^2\right] \\ & \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{01}^2}\right] \\ & \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[(N+1)\left(\frac{x}{w_{01}} - \sigma_1\right)^2\right]^n \\ & \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{01}^2}\right]^l \\ & \times \left[\left(\frac{x}{w_{01}} - \sigma_1\right) \cos\beta - \frac{y}{w_{01}} \sin\beta\right] \\ & + \eta \exp\left[-(N+1)\left(\frac{x}{w_{02}} + \sigma_2\right)^2\right] \\ & \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{02}^2}\right] \\ & \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[(N+1)\left(\frac{x}{w_{02}} + \sigma_2\right)^2\right]^n \\ & \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{02}^2}\right]^l \left(\frac{x}{w_{02}} + \sigma_2\right) \\ & = 0, \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} & \mu \exp\left[-(N+1)\left(\frac{x}{w_{01}} - \sigma_1\right)^2\right] \\ & \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{01}^2}\right] \\ & \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[(N+1)\left(\frac{x}{w_{01}} - \sigma_1\right)^2\right]^n \\ & \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{01}^2}\right]^l \\ & \times \left[\left(\frac{x}{w_{01}} - \sigma_1\right) \sin\beta + \frac{y}{w_{01}} \cos\beta\right] \\ & - \eta \frac{y}{w_{02}} \exp\left[-(N+1)\left(\frac{x}{w_{02}} + \sigma_2\right)^2\right] \\ & \times \exp\left[-\frac{(N+1)y^2}{w_{02}^2}\right] \\ & \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[(N+1)\left(\frac{x}{w_{02}} + \sigma_2\right)^2\right]^n \\ & \times \sum_{l=0}^N \frac{1}{l!} \left[\frac{(N+1)y^2}{w_{02}^2}\right]^l \\ & = 0, \end{aligned} \quad (4b)$$

式中振幅比 $\eta = E_{02}/E_{01}$, 相对离轴参数 $\sigma_i = s/w_{0i}$, 束腰宽度比 $\mu = w_{01}/w_{02}$. 由(4a)和(4b)式可知, 合成光涡旋的位置、数目和拓扑电荷与控制参数(包括相对相位 β , 振幅比 η , 束腰宽度比 μ , 相对离轴参数 σ_i 以及光束阶数 N 等)有关. 在(4a), (4b)式中令 $N=0$, 得到决定两束拓扑电荷 $m_{1,2} = \pm 1$ 离轴高斯光束形成合成光涡旋位置的方程组. 进一步, 对 $\beta = 0^\circ, \beta = 180^\circ$ 情况, 令 $\mu = 1$, 就得到文献[12]中的(18a)(18b)式.

2.1. 合成光涡旋随相对位相 β 的变化

由(4a)和(4b)式得出光涡旋坐标 x/w_0 和 y/w_0 随相对位相 β 的变化见图 1(a)和(b), 图 1(c)为合成光涡旋随位相变化的轨迹图, 实心圆表示 $m = +1$, 空心圆表示 $m = -1$ (下同). 计算参数为 $\eta = 1, \mu = 1, \sigma = 0.7, N = 10$. 从图 1 可以看出有三个临界值 $\beta_{c1} = -20^\circ, \beta_{c2} = 0^\circ$ 和 $\beta_{c3} = 20^\circ$, 随着相对位相 β 增加会分别出现 2, 6, 4, 6, 2 个光涡旋, $\beta = \beta_{c2}$ 时有四个光涡旋和一条 $x = 0$ 位错线. $\beta_{c2} < |\beta| < \beta_{c3}$ 时有六个光涡旋, $|\beta| \geq \beta_{c3}$ 有两个光涡旋. 图 1(c)中随着 β 增加位于 y 轴最右边和 y 轴最左边的光涡旋都是顺时针旋转移动, 定义净拓扑电荷 m_{net} 为合成光涡旋拓扑电荷之和^[12], 则此时拓扑电荷守恒 $m_{\text{net}} = m_{\text{sum}} = 0$.

对 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 180^\circ$ 两种有代表性情况^[12], 由 (4a) 和 (4b) 式知当 $\beta = 0^\circ$ 时, 合成光涡旋位于 x 轴

上的 $|x| < s$ 范围内, $\beta = 180^\circ$ 时, 合成光涡旋位于 x 轴上的 $|x| > s$ 范围内.

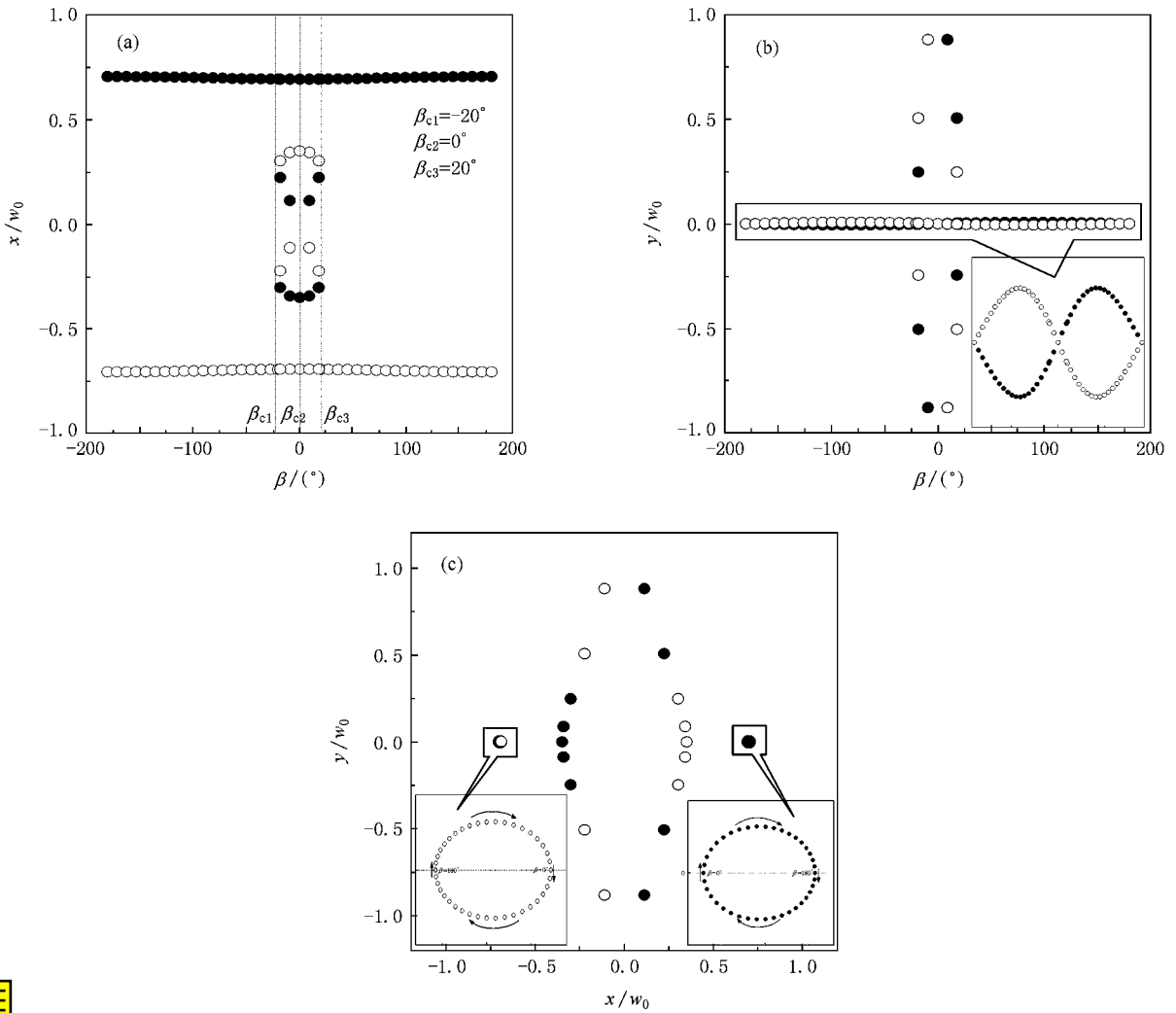


图 1 合成光涡旋随相对相位 β 的变化 (a) 和 (b) 分别为光涡旋坐标 x/w_0 和 y/w_0 与相对相位 β 的关系 (c) 合成光涡旋随位相 β 变化的轨迹图 (实心圆表示 $m = +1$, 空心圆表示 $m = -1$, 内插框中为局部放大图)

2.2. 合成光涡旋随振幅比 η 的变化

当 $\beta = 0^\circ$ 时, 由 (4a) 和 (4b) 式得出合成光涡旋坐标 x/w_0 随振幅比 η 的变化见图 2(a), 计算参数为 $\mu = 1, \sigma = 0.7, N = 10$. 由图 2(a) 可以看出 η 的五个临界值分别为 $\eta_{c1} = 0.27, \eta_{c2} = 0.77, \eta_{c3} = 1, \eta_{c4} = 1.29, \eta_{c5} = 3.65$. $0 < \eta \leq \eta_{c1}$ 有一个光涡旋 $m_{net} = +1, \eta_{c1} < \eta \leq \eta_{c2}$ 有三个光涡旋 $m_{net} = +1, \eta_{c2} < \eta < \eta_{c3}$ 时有五个光涡旋 $m_{net} = +1$, 当 $\eta = \eta_{c3}$ 时有四个光涡旋和一条 $x = 0$ 位错线 $m_{net} = 0, \eta_{c3} < \eta < \eta_{c4}$ 有五个光涡旋 $m_{net} = -1, \eta_{c4} \leq \eta < \eta_{c5}$ 有三个光涡旋 $m_{net} = -1, \eta \geq \eta_{c5}$ 有一个光涡旋 $m_{net} = -1$. 由此可

见除 $\eta = \eta_{c3} = 1$ 之外, 拓扑电荷都不守恒 $m_{net} \neq m_{sum}$.

当 $\beta = 180^\circ$ 时, 合成光涡旋坐标 x/w_0 随振幅比 η 的变化见图 2(b), 计算参数与图 2(a) 相同. 由图 2(b) 可以看出 η 变化时只有两个光涡旋且始终满足拓扑电荷守恒 $m_{net} = m_{sum}$.

2.3. 合成光涡旋随束腰宽度比 μ 的变化

当 $\beta = 0^\circ$ 时, 由 (4a) 和 (4b) 式得出合成光涡旋坐标 x/w_0 随束腰宽度比 μ 的变化见图 3(a), 计算参数为 $\eta = 1, w_{01} = 1 \text{ mm}, \sigma = 0.7, N = 10$. 由图 3(a) 可以看出在 $0 < \mu \leq 0.5$ 时有三个光涡旋, 拓扑电荷不守恒 $m_{net} = -1 \neq m_{sum}$.

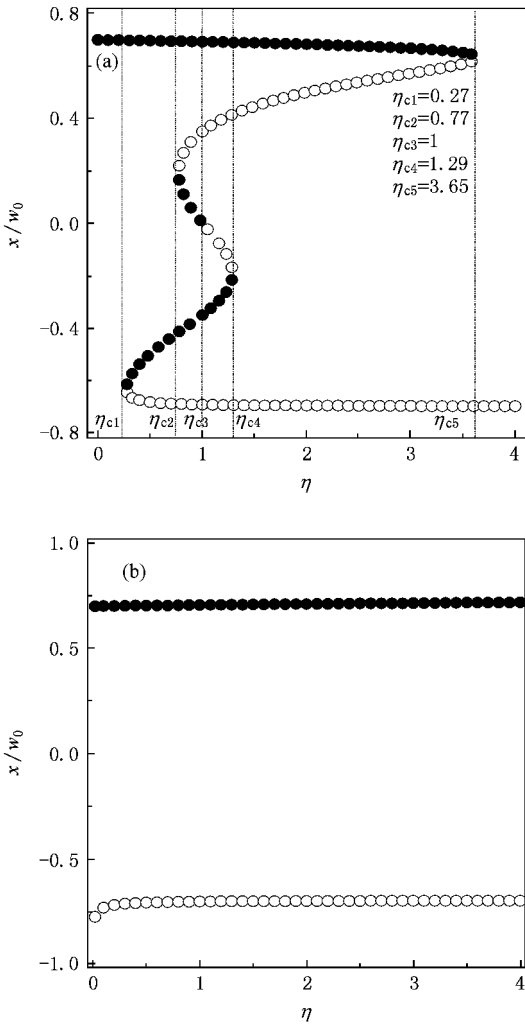


图2 合成光涡旋坐标 x/w_0 随振幅比 η 的变化 (a) $\beta = 0^\circ$ (b) $\beta = 180^\circ$

当 $\beta = 180^\circ$ 时,合成光涡旋坐标 x/w_0 随束腰宽度比 μ 的变化见图 3(b),计算参数与图 3(a)相同.由图 3(b)可以看出有一个临界值 $\mu_c = 0.465$,当 $0 < \mu \leq \mu_c$ 时只有一个光涡旋, $\mu_c < \mu \leq 0.5$ 时有三个光涡旋,且 $m_{\text{net}} = -1 \neq m_{\text{sum}}$.

2.4. 合成光涡旋随相对离轴参数 σ 的变化

当 $\beta = 0^\circ$ 时,由(4a)和(4b)式得出合成光涡旋坐标 x/w_0 随相对离轴参数 σ 的变化见图 4(a),计算参数为 $\eta = 0.8$, $\mu = 1$, $N = 10$.由图 4(a)可以看出 σ 有三个临界值,分别为 $\sigma_{c1} = 0.639$, $\sigma_{c2} = 0.659$ 和 $\sigma_{c3} = 0.709$.随 σ 的变化,分别会出现 1, 3, 5, 3 个光涡旋,且 $m_{\text{net}} = +1 \neq m_{\text{sum}}$.

当 $\beta = 180^\circ$ 时,合成光涡旋坐标 x/w_0 随离轴参

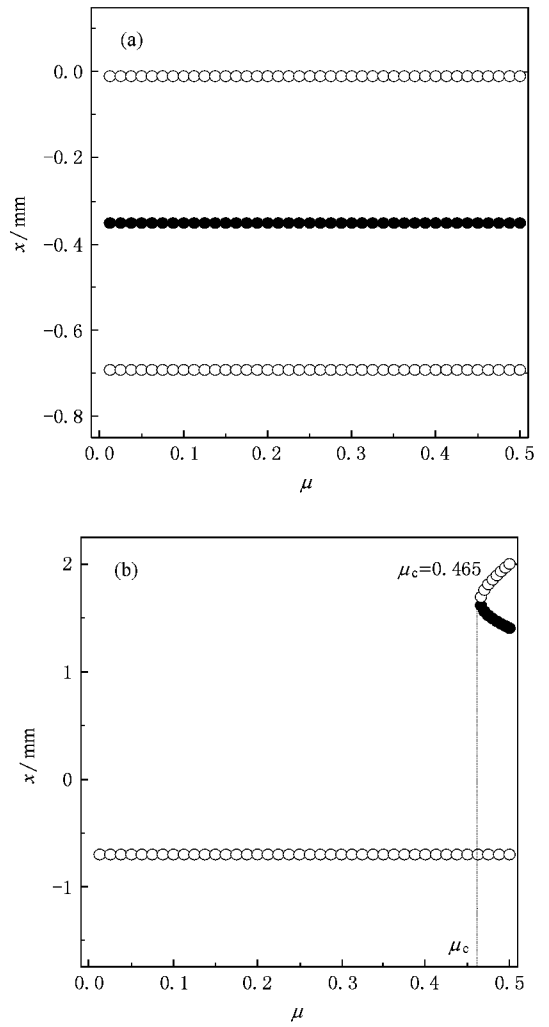


图3 合成光涡旋坐标 x/w_0 随束腰宽度比 μ 的变化 (a) $\beta = 0^\circ$ (b) $\beta = 180^\circ$

数 σ 的变化见图 4(b),计算参数与图 4(a)相同.由图 4(b)可以看出在 σ 变化中始终有两个光涡旋,且 $m_{\text{net}} = m_{\text{sum}}$.

2.5. 合成光涡旋随阶数 N 的变化

当 $\beta = 0^\circ$ 时,由(4a)和(4b)式得出合成光涡旋坐标 x/w_0 随阶数 N 的变化见图 5(a),计算参数为 $\eta = 0.8$, $\mu = 1$, $\sigma = 0.7$.由图 5(a)可以看出有两个临界值 $N_{c1} = 5$, $N_{c2} = 9$,随着 N 变化始终有 $m_{\text{net}} = +1 \neq m_{\text{sum}}$.

当 $\beta = 180^\circ$ 时,合成光涡旋坐标 x/w_0 随阶数 N 的变化见图 5(b),计算参数与图 5(a)相同.由图 5(b)可以看出在 N 变化中有两个光涡旋,且 $m_{\text{net}} = m_{\text{sum}}$.

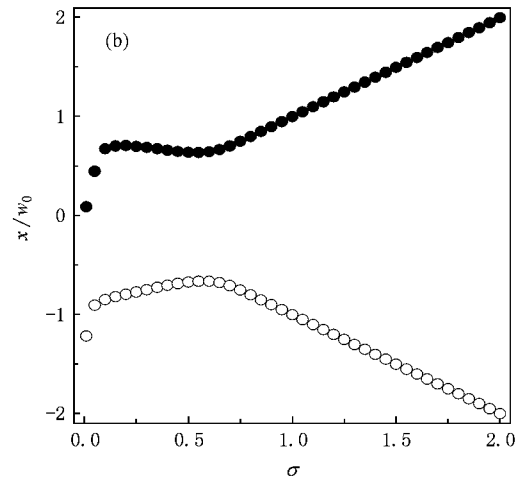
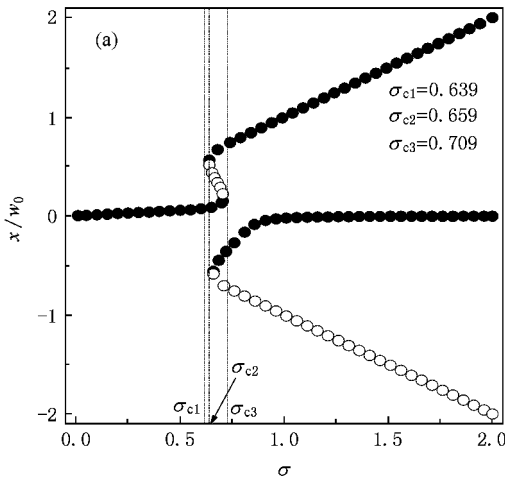


图 4 合成光涡旋坐标 x/w_0 随相对离轴参数 σ 的变化 (a) $\beta = 0^\circ$ (b) $\beta = 180^\circ$

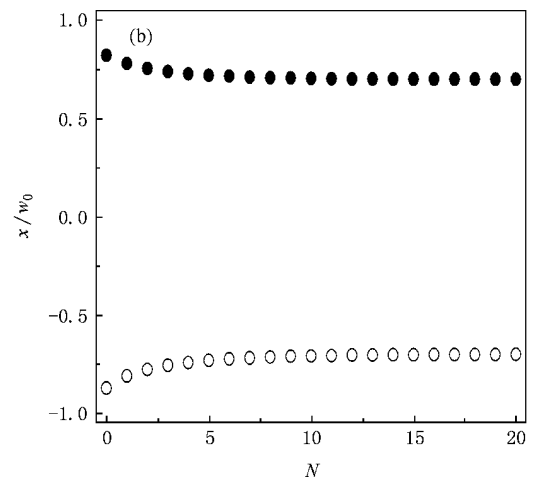
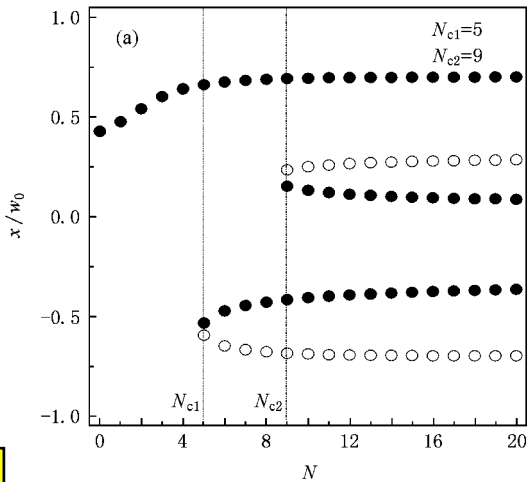


图 5 合成光涡旋坐标 x/w_0 随阶数 N 的变化 (a) $\beta = 0^\circ$ (b) $\beta = 180^\circ$

3. 合成光涡旋在自由空间中的动态传输

将 (3) 式代入菲涅耳衍射积分公式得到

$$E(x, y, z) = \frac{i w_0}{\xi(N+1) + i} \exp\left(-i \frac{x'^2 + y'^2}{\xi}\right) \times \left\{ \exp\left[i\beta \chi(q_{1xs}q_{1y} + iq_{2xs}q_{2y})\right] + \chi(q_{1xs}q_{1y} - iq_{2xs}q_{2y}) \right\}, \quad (5)$$

式中

$$q_{1xs} = \exp\left[-i \frac{\sigma^2 - 2x'\sigma}{\xi} - \frac{(x' - \sigma)^2}{\xi^2(N+1) + i\xi}\right] \times \sum_{m=0}^N \sum_{k=0}^m \frac{(2m+1)(N+1)^m}{m(2m+1-2k)!k!} \times \left[\frac{i(x' - \sigma)}{\xi(N+1) + i}\right]^{2m+1}$$

$$\times \left[-\frac{\xi^2(N+1) + i\xi}{4(x' - \sigma)^2}\right]^k, \\ q_{1y} = \exp\left[-\frac{y'^2}{\xi^2(N+1) + i\xi}\right] \times \sum_{m=0}^N \sum_{k=0}^m \frac{(2m)(N+1)^m}{m(2m-2k)!k!} \times \left[\frac{iy'}{\xi(N+1) + i}\right]^{2m} \times \left[-\frac{\xi^2(N+1) + i\xi}{4y'^2}\right]^k,$$

$$q_{2xs} = \exp\left[-i \frac{\sigma^2 - 2x'\sigma}{\xi} - \frac{(x' - \sigma)^2}{\xi^2(N+1) + i\xi}\right] \times \sum_{m=0}^N \sum_{k=0}^m \frac{(2m)(N+1)^m}{m(2m-2k)!k!} \times \left[\frac{i(x' - \sigma)}{\xi(N+1) + i}\right]^{2m}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left[-\frac{\xi^2(N+1) + i\xi}{4(x' - \sigma)^2} \right]^k, \\
 q_{2y} = & \exp \left[-\frac{y'^2}{\xi^2(N+1) + i\xi} \right] \\
 & \times \sum_{m=0}^N \sum_{k=0}^m \frac{(2m+1)(N+1)^n}{m(2m+1-2k)!k!} \\
 & \times \left[\frac{iy'}{\xi(N+1) + i} \right]^{2m+1} \\
 & \times \left[-\frac{\xi^2(N+1) + i\xi}{4y'^2} \right]^k, \\
 q_{1xss} = & \exp \left[-i \frac{\sigma^2 + 2x'\sigma}{\xi} - \frac{(x' + \sigma)^2}{\xi^2(N+1) + i\xi} \right] \\
 & \times \sum_{m=0}^N \sum_{k=0}^m \frac{(2m+1)(N+1)^n}{m(2m+1-2k)!k!} \\
 & \times \left[\frac{i(x' + \sigma)}{\xi(N+1) + i} \right]^{2m+1} \\
 & \times \left[-\frac{\xi^2(N+1) + i\xi}{4(x' + \sigma)^2} \right]^k, \\
 q_{2xss} = & \exp \left[-i \frac{\sigma^2 + 2x'\sigma}{\xi} - \frac{(x' + \sigma)^2}{\xi^2(N+1) + i\xi} \right] \\
 & \times \sum_{m=0}^N \sum_{k=0}^m \frac{(2m)(N+1)^n}{m(2m-2k)!k!} \\
 & \times \left[\frac{i(x' + \sigma)}{\xi(N+1) + i} \right]^{2m} \\
 & \times \left[-\frac{\xi^2(N+1) + i\xi}{4(x' + \sigma)^2} \right]^k, \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$x' = x/w_0, \quad y' = y/w_0, \quad (7)$$

$$\xi = \frac{z}{z_R}, \quad z_R = \frac{1}{2}kw_0^2 \text{ (瑞利尺寸)}, \quad (8)$$

且已设 $w_{01} = w_{02} = w_0$.

由(5)式得出合成光涡旋位置随相对传输距离 z/z_R 的变化见图6, 计算参数为 $\beta = 0^\circ$, $\mu = 1$, $\sigma = 0.7$, $\eta = 0.8$, $N = 1$. 图6表明, 在自由空间传输时合成光涡旋的数目、位置发生变化, 而且在传输过程中拓扑电荷不一定守恒. 例如, 当 $z/z_R = 0$ 时, 有一个 $m = +1$ 位于 $(x/w_0 = 0.476, y/w_0 = 0)$ 的合成光涡旋, $m_{\text{net}} = +1$; 当 $z/z_R = 0.05$ 时, 有两个拓扑电荷为 $m_{1,2} = +1, -1$ 分别位于 $(x/w_0 = 0.479, y/w_0 = 0.012)$, $(x/w_0 = -0.082, y/w_0 = 9.965)$ 的合成光涡旋, $m_{\text{net}} = 0$. 当 $z/z_R = 3$ 时, 有16个合成光涡旋, $m_{\text{net}} = 0$.

令 $N = 0$ 时(5)式描述两束拓扑电荷 $m_{1,2} = \pm 1$ 的离轴高斯涡旋光束干涉叠加形成的合成光涡旋在自由空间中的传输, 与文献[11]中不同的是, 后者研究两束拓扑电荷均为 $+1$ 离轴高斯涡旋光束形成合成光涡旋的自由空间传输. 用(5)式的计算例见图7, 除 $N = 0$ 外, 计算参数与图6相同. 由图7可见, 与图6类似, 在自由空间传输时, 合成光涡旋数目和位置随传输距离而变化, 并且拓扑电荷也不一定守恒. 例如, 当 $z/z_R = 0$ 时, 有一个 $m = +1$ 位于 $(x/w_0 = 0.428, y/w_0 = 0)$ 的合成光涡旋, $m_{\text{net}} = +1$; 当 $z/z_R = 0.05$ 时, 有两个拓扑电荷为 $m_{1,2} = +1, -1$ 分别位于 $(x/w_0 = 0.427, y/w_0 = 0.022)$, $(x/w_0 = -0.080, y/w_0 = 14.287)$ 的合成光涡旋, $m_{\text{net}} = 0$. 当 $z/z_R = 3$ 时, 有2个合成光涡旋, $m_{\text{net}} = 0$.

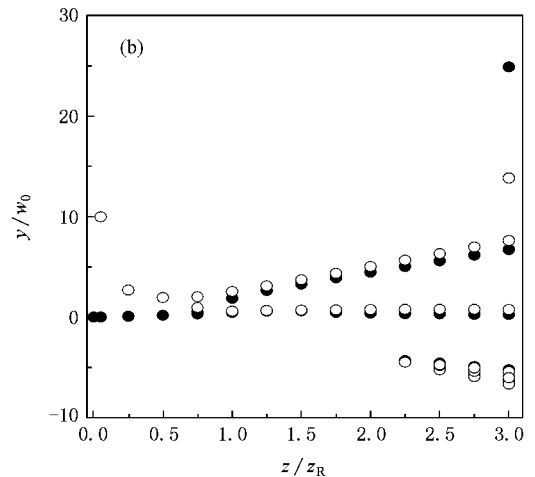
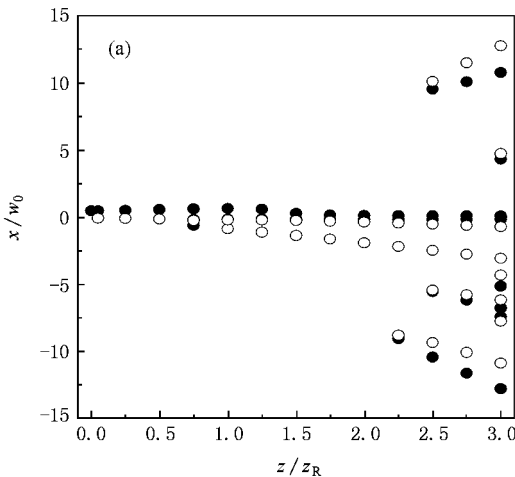


图6 合成光涡旋随相对传输距离 z/z_R 的变化 (a) x/w_0 方向 (b) y/w_0 方向

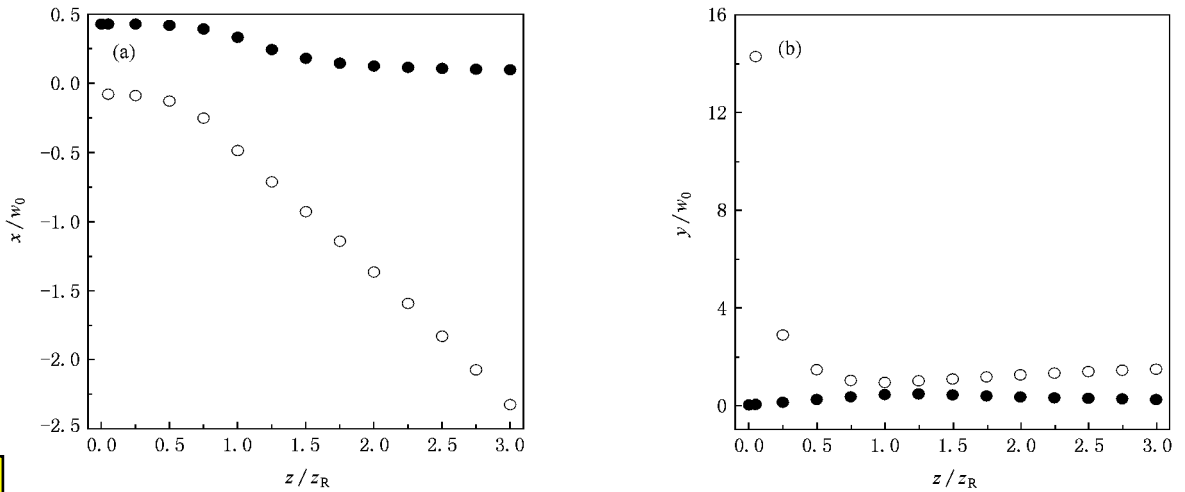


图7 离轴高斯涡旋光束合成光涡旋随相对传输距离 z/z_R 的变化 (a) x/w_0 方向 (b) y/w_0 方向

4. 比较与小结

本文对两束拓扑电荷 $m_{1,2} = \pm 1$ 的离轴平顶高斯涡旋光束干涉叠加场中的合成光涡旋及其在自由空间中的传输做了详细研究,并与文献中已有工作做了比较.结果表明,合成光涡旋的数目、位置和净拓扑电荷随控制参数,包括相对位相 β 、振幅比 η 、束腰宽度比 μ 、相对离轴参数 σ_i 、光束阶数 N 、以及传输距离 z/z_R 而变化.当改变控制参数和在自由空间传输时,会出现合成光涡旋的移动、产生和湮没等现象.这些结论与文献[11, 12]是相同的,表征了合成光涡旋演化的一般特征.但不同的是,对平顶高斯涡旋光束有更多的控制参数(例如光束阶数 N)可变化,合成光涡旋随相对位相 β 变化的轨迹随光束类型和光束控制参数而异.在奇点光学中,拓扑电荷定义为^[1]

$$m = \frac{1}{2\pi} \oint_C \nabla \varphi(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r}, \quad (9)$$

式中, C 为围绕位相奇点沿逆时针封闭旋转一周的曲线, $\varphi(\mathbf{r})$ 为光场的位相, ∇ 为梯度算符.绕位相奇

点逆时针旋转一周位相增加为 $2\pi m$, 则拓扑电荷为 $+m$, 反之,绕位相奇点顺时针旋转一周位相增加为 $2\pi m$, 则拓扑电荷为 $-m$.拓扑电荷与轨道角动量相联系,是描述涡旋光的一个重要物理量^[16]. 本文的研究指出,无论改变控制参数或在自由空间中传输时,拓扑电荷不一定守恒,而文献[12]中对两束拓扑电荷 $m_{1,2} = \pm 1$ 高斯涡旋光束在束腰处形成的合成光涡旋研究得出了拓扑电荷总是守恒的结论.比较得知,文献[12]是针对 $\eta = \eta_{c3} = 1$ 进行数值计算,外推得出的结论.然而,这只是本文中的一个特殊情况.图 7(a)说明,当 $\beta = 0^\circ$, $\eta \neq \eta_{c3}$ 时,有 $m_{\text{net}} \neq m_{\text{sum}}$, 计算表明,这一结论对 $N = 0$ 也成立.文献[11]对 $m_{1,2} = +1$ 的高斯涡旋光束叠加形成的合成光涡旋在自由空间传输的研究得出拓扑电荷守恒的结论,但本文对 $m_{1,2} = \pm 1$ 的高斯涡旋光束形成合成光涡旋在自由空间的传输结果(图 7)却表明拓扑电荷不一定守恒.因此,一般结论应当是,由两束平行、离轴涡旋光束干涉叠加形成的合成光涡旋无论在束腰处或在自由空间传输时,拓扑电荷不总是守恒.拓扑电荷守恒仅是特殊情况,可以通过改变离轴光束的拓扑电荷、相对位相和振幅比等控制参数来实现.

- [1] Soskin M S, Vasnnetsov M V 2001 *Progress in Optics* **42** 219
 [2] Indebetouw G 1993 *J. Mod. Opt.* **40** 73
 [3] Molina-Terriza G, Reclons J, Torres J P, Torner L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 023902
 [4] Schwarz U T, Sogomonian S, Maier M 2002 *Opt. Commun.* **208** 255

- [5] Orlov S, Regelskis K, Smilgevicus V, Stabinis A 2002 *Opt. Commun.* **209** 155
 [6] Orlov S, Stabinis A 2003 *Opt. Commun.* **226** 97
 [7] Orlov S, Regelskis K, Smilgevicus V, Stabinis A 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** S255
 [8] Dong L W, Ye F W, Wang J D, Li Y P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53**

- 3353 (in Chinese) [董亮伟、叶芳伟、王建东、李永平 2004 物理学报 **53** 3353]
- [9] Flossmann F , Schwarz U T , Maier M. 2005 *Opt. Commun.* **250** 218
- [10] Wang L , Wang Q F , Wang X Q , Lü B D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 201 (in Chinese) [王莉、王庆峰、王喜庆、吕百达 2007 物理学报 **56** 201]
- [11] Pyragaitė V , Stabinis A 2002 *Opt. Commun.* **213** 187
- [12] Maleev I D , Swartzlander Jr. G A 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1169
- [13] Lü B D , Luo S R , Zhang B 1999 *J. Mod. Opt.* **42** 12
- [14] Molina-Terriza G , Recolons J , Torner L 2000 *Opt. Lett.* **25** 1135
- [15] Berry M V , Dennis M R 2000 *Proc. R. Soc. London A* **456** 2059
- [16] Soskin M S , Gorshkov V N , Vasnetsov M V , Malos J T , Heckenberg N R 1997 *Phys. Rev. A* **56** 4064

Composite optical vortices formed by two flattened Gaussian vortex beams and their propagation in free space^{*}

Yan Hong-Wei Cheng Ke Lü Bai-Da[†]

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

(Received 29 November 2007 ; revised manuscript received 21 January 2008)

Abstract

The composite optical vortices (OVs) in the superimposed field of two parallel, off-axis flattened Gaussian vortex beams with topological charge $m_{1,2} = \pm 1$ at the waist plane and their propagation dynamics in free space are studied. Detailed numerical calculations and analysis show that the number, position and net topological charge of composite OVs depend on the control parameter, such as the relative phase, amplitude ratio, waist-width ratio, relative off-axis distance, beam order, and on the propagation distance, but the topological charge is not always conserved.

Keywords : singular optics , composite optical vortex (OV) , flattened Gaussian vortex beam , topological charge

PACC : 4225

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10574097).

[†] E-mail : yanhongwei0416@163.com (H. Yan) , baidalu0@tom.com (B. Lü)