

doi:10.3788/gzxb20144303.0326001

利用柱透镜调控涡旋光束的拓扑结构

方亮,甘雪涛,赵建林

(空间应用物理与化学教育部重点实验室,陕西省光信息技术重点实验室,西北工业大学 理学院,西安 710072)

摘 要:提出了一种利用柱透镜调控涡旋光束拓扑结构的方法.利用计算全息法制作的叉形光栅掩模板,实验获得了具有不同拓扑荷的涡旋光束,分析了涡旋光束通过柱透镜变换后的强度和相位分布.结果表明,涡旋光束经柱透镜变换后,其拓扑荷符号将发生改变,并且高阶涡旋光束退化为多个分离的一阶涡旋光束.利用高阶激光模式的线性叠加特性以及古依相移对实验结果进行了理论解释,并通过数值模拟对实验结果进行了验证.

关键词:奇点光学;涡旋光束;拓扑荷;柱透镜;古依相位

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0326001-5

Topological Transformation of Vortex Beams Using Cylindrical Lens

FANG Liang, GAN Xue-tao, ZHAO Jian-lin

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education and Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The topological transformation of vortex beams using cylindrical lens is experimentally and numerically demonstrated. The intensity distributions and phase structures of vortex beams with different topological charges were analyzed after the transformation by a cylindrical lens, which were generated using the computing generated holographic method. The results show that the transformation of the cylindrical lens results in the sign change of the topological charges of the vortex beams. In addition, the higher order vortex beams decay into a beam with multiple singularities with charge-one. These observations were analyzed based on the linear superposition of higher order laser modes and Gouy phase delay. Finally, the experiment results were verified by the numerical simulations.

Key words: Singular optics; Topological charge; Cylindrical lens; Gouy phase; Vortex beam

OCIS Codes: 260.6042; 050.4865; 050.5080; 090.1970

0 引言

涡旋光束是一类波前相位围绕光场中心呈螺旋变化的空间结构光场^[1-3].该光束的特点主要体现在其中心点与任意一点均在等相位线上,因而呈现相位奇点^[2],并且导致光场形成中空的强度分布.另外,涡旋光束的螺旋相位结构,使其光子在传输过程中同时围绕中心轴线发生旋转,即具有轨道角动量,且其大小正比于光束的拓扑荷数^[4].在非线性光学领域,如何利用非线性效应对涡旋光束拓扑结构引起的方位角调制非稳现象进行抑制已成为一个研究热点^[5-8].在自由空间,涡旋光束的复杂拓扑结构可以驱动光场能流在横

向发生旋转,进而出现类似流场中的涡旋产生、湮灭、旋转等动力学行为^[9-12].此外,表征涡旋光束拓扑结构的拓扑荷可以取任意正整数,意味着该光场携带的轨道角动量不存在理论上限,从而使得涡旋光束在光学微操控^[13-14],在基于光学比特的传统通信^[15]和量子通信^[16]等方面显示出巨大的应用前景.

研究表明,涡旋光束的拓扑结构决定了其光场特性及传输动力学行为.因此,如果可以对涡旋光束拓扑结构进行调控和变换,不仅可以调制涡旋光场特性,而且可以为其工程应用提供更多的自由度.文献^[17]报道了多个奇点的涡旋光束可以湮灭出边位错拓扑结构,而多边位错拓扑结构可以演化为螺旋相位结

基金项目:国家重大科学研究(973)计划(No. 2012CB921900)和国家自然科学基金(No. 61377035)资助

第一作者:方亮(1983-),女,助理实验师,硕士,主要研究方向为非线性光子晶体光纤和奇异光学. Email:fangliang@nwpu.edu.cn

通讯作者:赵建林(1958-),男,教授,博士,主要研究方向为数字光信息处理及数字全息术. Email:jlzhao@nwpu.edu.cn

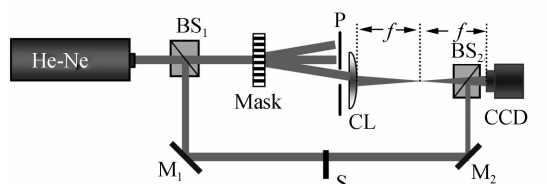
收稿日期:2014-01-06; **录用日期:**2014-03-03

<http://www.photon.ac.cn>

构^[18];高阶涡旋光束在受到各向异性线性和非线性调制时,将退化为多个一阶螺旋拓扑结构^[19].然而,在文献[17-19]所报道的拓扑结构变换过程中,由光场总相位结构决定的总拓扑荷数并未发生变化.本文利用柱透镜对涡旋光束进行变换,从实验上利用位于柱透镜前和后的涡旋光束与平面波干涉特性对其拓扑荷符号进行判断;进而通过将涡旋光束分解为多个厄米-高斯模式,并结合透镜聚焦引起的古依相移,对实验结果进行了理论分析和数值模拟验证.

1 实验结果及分析

采用计算全息术产生涡旋光束^[18],并利用马赫-曾德干涉仪光路检验涡旋光束的拓扑荷.通过计算机数值模拟携带有一阶涡旋相位的光场与平面波干涉而构造出叉形全息光栅结构,并通过半导体微加工工艺将该光栅结构制作在透明掩模板上.采用掩模板的优点是可以将调制光栅的周期缩小至 $5\ \mu\text{m}$,有利于对不同衍射级次涡旋光束的空间滤波.图1为实验光路原理图.自He-Ne激光器(波长 $632.8\ \text{nm}$,功率 $2\ \text{mW}$,束腰半径 $2\ \text{mm}$)出射的基模高斯光束经分光棱镜(BS_1)分为两束,其中一束经掩模板(Mask)上的叉形全息光栅衍射后,在 ± 1 (± 2)级衍射光场上分别形成拓扑荷 l 为 ± 1 (± 2)的涡旋光束,通过小孔滤波器(P)滤波后得到不同阶数的涡旋光束.另一束作为参考光与所产生的涡旋光束经第二个分光棱镜(BS_2)合并并发生干涉,利用干涉图样可以对涡旋光束的拓扑荷进行判断,其中遮挡屏(S)用于控制参考光的通与断.为研究柱透镜对涡旋光束拓扑结构的变换特性,令所产生涡旋光束通过一个焦距 f 为 $20\ \text{cm}$ 的柱透镜(CL),并利用CCD记录像平面上光场强度分布及与平面波的干涉图样.



BS_1 : beamsplitter, M: Mirror, Mask: Mask, P: Pinhole filter, CL: cylindrical lens, S: shutter, CCD: charge coupled device

图1 实验光路原理

Fig. 1 Schematic of the experiment setup

图2为具有不同拓扑荷的涡旋光束经柱透镜变换后的实验结果,自上而下各排分别对应拓扑荷为 $+1$, $+2$ 和 -2 的情况.由于实验中无法直接得到涡旋光场的相位结构,需要利用其螺旋方向对拓扑荷符号进行定义,所以本文利用干涉图样的叉形条纹指向来定义拓扑荷符号^[10,17],取叉形条纹向下的涡旋光束的拓扑荷为正.图2(a_1)~(a_3)和图2(b_1)~(b_3)分别为所得涡旋光束的强度图样及与平面波的干涉图样.可以看

出,涡旋光束由于其拓扑结构中心的相位奇点而呈现出中空的强度分布.相应的干涉图样中,与 $+1$ 阶涡旋光束对应的干涉图样中出现了由一条逐渐分为两条的向下叉形条纹,说明涡旋光束具有围绕中心奇点螺旋变化的拓扑结构,且该拓扑结构的螺旋位错具有 2π 相位突变.类似地,与 $+2$ 和 -2 阶涡旋光束对应的干涉图样中均出现了由一条分为三条的叉形条纹,证明了螺旋状拓扑结构的存在,且所对应螺旋位错的相位突变为 4π .另外,由于拓扑荷符号不同,拓扑结构的螺旋位错旋转方向不同,从而引起图2(b_2)和(b_3)中叉形条纹的方向相反.图2(c_1)~(c_3)和图2(d_1)~(d_3)分别为经柱透镜变换后光场的强度图样及其与平面波的干涉图样.从一阶涡旋光束变换后的强度分布可以看出,由于柱透镜对涡旋光束沿一个方向进行调制,变换后光场分布呈现出椭圆形强度分布,并且中心暗核也呈现椭圆状.与高斯光束经柱透镜变换后呈现出椭圆形光斑不同,该椭圆形涡旋光束的长轴方向与竖直方向有一个夹角,并且在亮环的上、下部分形成两个强度较大的亮点.由于涡旋光束的螺旋拓扑结构调制,其在横向产生均匀的旋转能流,该旋转能流与柱透镜共同作用导致出现倾斜强度分布.基于相同的原理,在柱透镜调制下, $+2$ 和 -2 阶涡旋光束的强度也演化为倾斜椭圆形分布,且上、下部分存在强度较大的光点.但与一阶涡旋光束所不同,柱透镜对涡旋光束的不对称调制与光束的旋转能流相互作用,使其发生了强烈的方位角调制非稳过程,从而使得二阶涡旋光束演化出两个相互分离的暗核,且每个暗核均比二阶涡旋光束暗核的尺寸小.该演化现象暗示了二阶涡旋光束退化为两个具有一阶拓扑荷的螺旋位错.另外,具有不同拓扑符号的二阶涡旋光束演化结果显示,两个暗核排列方向不同.

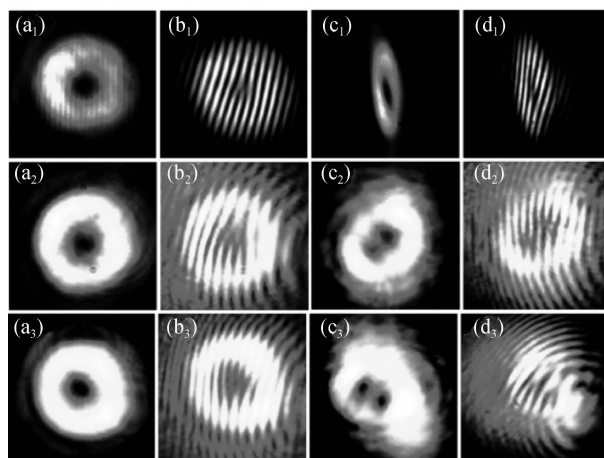


图2 涡旋光束经柱透镜变换后的实验结果

Fig. 2 Experimental results of the transformed vortex beams after the cylindrical lens

为判断涡旋光束经柱透镜变换后的拓扑结构,图

2(d)给出了这些涡旋光束与平面波的干涉图样.可以看出,变换后,一阶涡旋光束的中心奇点处仍存在由1条分为2条的叉形干涉条纹,但叉形条纹方向反转,说明光束的拓扑荷符号发生了变化;二阶涡旋光束的两个暗核位置均存在由1条变为2条的叉形干涉条纹,表明形成了两个拓扑荷为1的螺旋位错,但从叉形条纹的方向可以判断,所形成的两个分离的一阶螺旋位错的拓扑荷与入射的二阶涡旋光束的拓扑荷符号相反.因此,二阶涡旋光束经过柱透镜变换后也发生了拓扑荷符号的改变.

2 理论分析与数值模拟

虽然涡旋光束变换后的强度分布可以利用旋转能流与柱透镜沿单方向调制的共同作用解释,但拓扑荷符号反转并不能从能流角度进行直观解释.考虑到理论上可以将涡旋光束分解为多个偶极光束^[20],因此可以通过分析偶极光束经柱透镜变换过程来解释涡旋光束的变换特性.实验上通常利用高斯光束附加一个螺旋相位来获得涡旋光束,这表明可以将图2中的涡旋光场近似描述为拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)模式^[20],即

$$LG_{pl}(r, \theta, z) = C_{pl} \frac{\omega_0}{\omega(z)} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^l \times L_p^l \left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right] \cdot \exp \left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp \left\{ -i \left[kz - (1+2p+l) \cdot \arctan \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right) \right] \right\} \exp \left[-i \frac{kr^2}{2R(z)} \right] \exp(i l \theta) \quad (1)$$

式中, C_{pl} 为常量, (r, θ, z) 为柱坐标系下的场点位置; $L_p^l[2r^2/\omega^2(z)]$ 为缔合拉盖尔多项式, p 表示沿径向(r 方向)的节线圆数目,拓扑荷数 l 表示沿幅角 θ 方向的节线数目; ω_0 为基模高斯光束的束腰半径,因子 $\arctan(\lambda z/\pi\omega_0^2)$ 表示纵向古依(Gouy)相移,因子 $\exp(i l \theta)$ 反映了光场的涡旋特性.结合图2(b₁)~(b₃)中干涉图样所表示的相位结构和拓扑荷与图2(a₁)~(a₃)中的光强分布,可以近似认为图2(a₁)~(a₃)所示涡旋光束分别符合 LG₀₁, LG₀₂ 和 LG₀₋₂ 模式.

拉盖尔-高斯模式是在柱坐标系求解稳态亥姆霍兹方程得到的一种高阶模式.如果在直角坐标系中求解亥姆霍兹方程,则可以得到另一种本征模式——厄米-高斯(Hermit-Gaussian, HG)模式,其数学表达式为^[20]

$$HG_{mn}(x, y, z) = C_{mn} \frac{\omega_0}{\omega(z)} H_m \left[\frac{\sqrt{2}x}{\omega(z)} \right] \times H_n \cdot \left[\frac{\sqrt{2}y}{\omega(z)} \right] \exp \left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp \left\{ -i \left[kz - (1+m+n) \cdot \arctan \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right) \right] \right\} \cdot \exp \left[-i \frac{kr^2}{2R(z)} \right] \quad (2)$$

式中, C_{mn} 为归一化常量, $H_m[\sqrt{2}x/\omega(z)]$ 和 $H_n[\sqrt{2}y/\omega(z)]$

分别为 m 阶和 n 阶厄米多项式,其余各项的含义与式(1)中对应项相同.根据厄米多项式定义,在垂直于光轴的横截面上, HG₁₀ 和 HG₀₁ 模分别含有分量 $x \exp[-r^2/\omega^2(z)]$ 和 $y \exp[-r^2/\omega^2(z)]$.因此,这两个模式沿 y 或 x 方向的光场中线上均存在 π 的相位突变,且强度分布呈现两个分离的亮斑,表现为偶极光束分布.结合式(1)、(2)以及缔合拉盖尔多项式,可以将 LG₀₁ 模分解为具有 $\pi/2$ 相位差的 HG₀₁ 和 HG₁₀ 模的线性叠加^[20-21],即

$$LG_{01} = HG_{10} + HG_{01} \exp(i\pi/2) \quad (3)$$

由于柱透镜仅对光束沿一个方向产生相位调制作用,而 HG₁₀ 和 HG₀₁ 模的相位结构也仅在一个方向上发生突变,因此,根据式(3)给出的模式线性叠加特性,可以将柱透镜对涡旋光束的变换分解为柱透镜分别对两个偶极光束的变换.描述 HG 模的式(2)表明这种光束含有古依相移 $\arctan(\lambda z/\pi\omega_0^2)$.该相移的存在,使得 HG 光束通过透镜焦点后会出现一个 π 的相移.本实验利用透镜对光束沿 x 方向调制,柱透镜的透射系数可表示为 $\exp[-ikx^2/(2f)]$,其中 k 是真空中波数, f 为柱透镜焦距,则 HG 光束透过该柱透镜后将在 x 方向(聚焦方向)产生一个 π 相移,而 y 方向不受任何相位调制.因此,当 HG₁₀ 光束透过该柱透镜后,其偶极光束的左右两个亮斑在 x 方向的相位分布分别由 π 和 0 变换为 2π 和 π (即 0 和 π),即光束的相位结构发生了反转.而 HG₀₁ 光束经柱透镜调制后,其偶极光束的上下两个亮斑之间的相位结构不发生变换.于是,根据式(3)将初始入射的 LG 光束分解,经过柱透镜的相位调制后,将演化为 $HG_{10} \exp(i\pi) + HG_{01} \exp(i\pi/2)$.因子 $\exp(i\pi)$ 表明变换后光束的拓扑荷符号发生了反转.

为验证实验和理论分析结果,进一步数值模拟 HG₁₀ 和 HG₀₁ 光束经柱透镜变换的过程.在柱透镜后表面,两光束可分别表示为 $HG_{10} \exp[-ikx^2/(2f)]$ 和 $HG_{01} \exp[-iky^2/(2f)]$.以此为初始光场,利用角谱理论数值求解其在不同传输距离处的菲涅耳衍射光场分布.图3(a₁)~(a₄)和图3(b₁)~(b₄)分别为 HG₁₀ 和 HG₀₁ 光束经过柱透镜变换过程中波前相位的数值模拟结果,插图为光强分布,其中第1列至第4列对应的观察位置分别为透镜焦点前20 cm、10 cm、透镜焦点后10 cm、20 cm.对比光束在透镜焦点前后的相位分布,可以看出, HG₁₀ 光束左右两个亮斑之间发生了相移(由 π 和 0 变换为 0 和 π),而 HG₁₀ 光束的相位没有发生变化,这与理论分析相一致.图3(c₁)~(c₄)为将图3(a₁)~(a₄)和图3(b₁)~(b₄)中的光束在保持 $\pi/2$ 相位差条件下线性叠加的结果,插图为光强分布.可以看到,所形成的涡旋光束出现椭圆形强度分布,其螺旋相位结构的旋转方向发生了改变,证明拓扑荷符号发生了反转.另外,数值模拟结果与图1中实验结果吻合得很好.

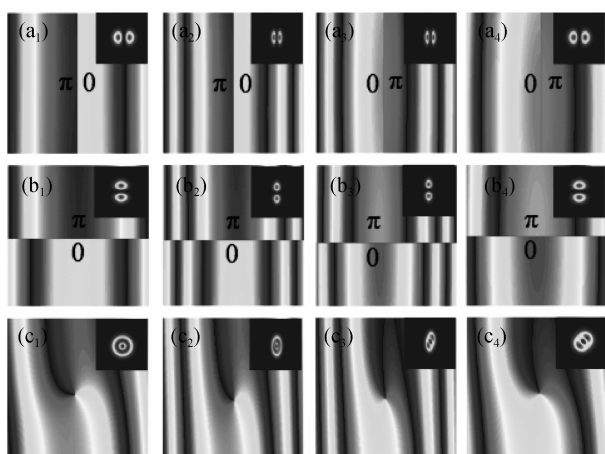


图3 一阶涡旋光束经柱透镜变换的数值模拟分析结果
Fig. 3 Simulation results of the transformed vortex beam with $l=1$ after the cylindrical lens

实验产生的二阶涡旋光束近似为 LG_{02} 模式,并且可以表示为多个高阶 HG 模式的线性叠加^[20-21],即

$$LG_{02} = HG_{02} - HG_{20} + 2HG_{11} \exp\left(i \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

与上述原理相同,三个高阶 HG 模受到柱透镜沿一个方向的调制后,分别产生不同的古依相移,从而改变了它们之间的相位结构.图4给出了与图3类似的数值模拟结果,其中图4(a₁)~(a₄)、图4(b₁)~(b₄)、图4(c₁)~(c₄)分别为 HG_{20} 、 HG_{02} 和 HG_{11} 光束经柱透镜变换过程中波前相位的演化结果,插图为光强分布,第1列至第4列对应的观察位置分别为透镜焦点前20 cm、10 cm、透镜焦点后10 cm、20 cm.从图中可以看出, HG_{11} 模经过变换后被附加了(相位变化,而 HG_{02} 、 HG_{20} 模的相位未发生变化.因此,变换后三个 HG 模的线性叠加结果为 $HG_{02} - HG_{20} + 2HG_{11} \exp(i\pi)\exp(i\pi/2)$,表明二

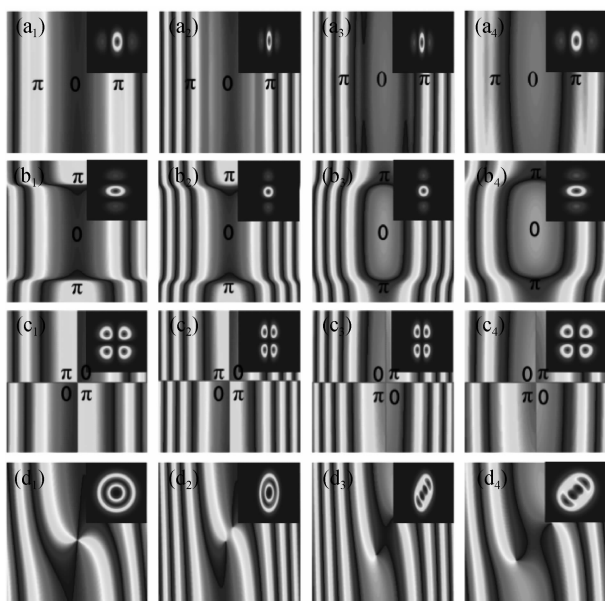


图4 二阶涡旋光束经柱透镜变换过程的数值模拟分析结果
Fig. 4 Simulation results of the transformed vortex beam with $l=2$ after the cylindrical lens

阶涡旋光束也出现了拓扑荷符号的反转.图4(d₁)~4(d₄)给出了根据式(4)中相位关系将图4(a₁)~(a₄)、图4(b₁)~(b₄)、图4(c₁)~(c₄)中三个对应光场线性叠加后的结果.对比经柱透镜变换前后相位奇点的数目和螺旋位错的旋转方向,可以看出,二阶涡旋光束退化为两个一阶螺旋位错,并且发生了拓扑荷符号的反转这与实验中观察到的现象相吻合(如图2所示).

由于任意阶数 LG 模式可以通过多个 HG 模式经过特定矩阵运算转换得到^[20-21],因此关于涡旋光束退化和拓扑转换的结论对于更高阶涡旋光束也是成立的.为进一步说明,取四阶涡旋光束为例.图5给出了四阶涡旋光束经柱透镜变换后的数值模拟结果.可以看到,图5(a)中的初始圆环形强度分布在变换后演化为具有四个分离暗核的椭圆形分布,如图5(c)所示.相应地,图5(d)所示的相位分布表明,在分离后的暗核位置处均出现了一阶螺旋位错.值得注意的是,图5(b)中初始相位的高阶螺旋位错沿顺时针方向旋转,而图5(d)中一阶螺旋位错均沿逆时针方向旋转.综上所述,四阶涡旋光束经柱透镜变换后,退化为多个一阶螺旋位错,且均发生了拓扑荷符号的改变.

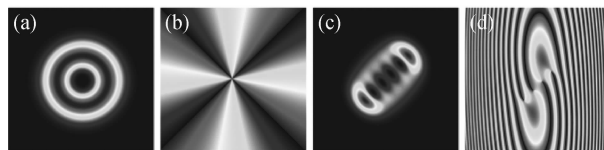


图5 四阶涡旋光束经柱透镜变换的数值模拟结果
Fig. 5 Simulation results of the transformed vortex beam with $l=4$ after the cylindrical lens

3 结论

利用柱透镜对不同阶数涡旋光束进行聚焦,实现了对其拓扑结构的变换.分别观察涡旋光束经柱透镜变换前后与平面波的干涉图样,发现表征螺旋相位拓扑结构的叉形条纹方向发生反转,表明涡旋光束经柱透镜变换后拓扑荷符号发生了改变.另外,因柱透镜仅沿一个方向对涡旋光束调制,破坏了其横向旋转能流,使得涡旋光束出现方位角调制非稳现象.结果显示,演化后光束强度呈现出非均匀的椭圆中空分布,同时高阶涡旋退化为多个分离的螺旋位错结构.通过将涡旋光束表示为多个 HG 模式的线性叠加,理论分析结果表明,因柱透镜对这些光场模式产生古依相移,它们之间的相位结构发生相对改变,从而使得叠加后涡旋光束的拓扑结构发生改变.因此,理论分析的数值模拟结果与实验结果相吻合.这种利用柱透镜变换对涡旋光束拓扑结构进行变换的方法,是调控涡旋光束的一种简便而有效的手段.

参考文献

- [1] CULLETT P, GIL L, ROCCA F. Optical vortices[J]. *Optical Communication*, 1989, **73**: 403-408.

- [2] KIVSHAR Y S, OSTROVSKAYA E A. Optical vortices: folding and twisting waves of light [J]. *Optical Photonics News*, 2001, **12**(4): 24-28.
- [3] DENNIS M R, HOLLERAN K O and PADGETT M J. Singular optics: optical vortices and polarization singularities [J]. *Progress in Optics*, 2009, **53**: 293-363.
- [4] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, WOERDMAN J P. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre - Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A*, 1992, **45**(11): 8185-8189.
- [5] SWARTZLANDER G A, LAW C T. Optical vortex solitons observed in Kerr nonlinear media[J]. *Physical Review Letter*, 1992, **69**(17): 2503-2506.
- [6] DESYATNIKOV A S, KIVSHAR Y S, TORNER L. Optical vortices and vortex solitons[J]. *Progress in Optics*, 2005, **47**: 291-391.
- [7] GAN X T, ZHANG P, LIU S, *et al.* Stabilization and breakup of optical vortices in presence of hybrid nonlinearity [J]. *Optical Express*, 2009, **17**(25): 23130-23136.
- [8] GAN X T, ZHANG P, LIU S, *et al.* Solitary wave evolution of optical planar vortices in self-defocusing photorefractive media[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(9): 3280-3286.
- [9] ROZAS D, SACKS Z, SWARTZLANDER G. Experimental observation of fluidlike motion of optical vortices[J]. *Physical Review Letter*, 1997, **79**: 3399-3402.
- [10] GAN X, ZHAO J, LIU S, *et al.* Generation and motion control of optical multi-vortex[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(12): 1142-1145.
- [11] CHENG Ke, XIANG An-ping, ZHONG Xian-qiong. Evolution of phase singularities of flat-topped vortex beam diffracted by an aperture[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2012, **41**(8): 936-945.
程科,向安平,钟先琼. 经光阑衍射的平顶涡旋光束位相奇点的演化特性. 光子学报, 2012, **41**(8): 936-945.
- [12] WANG Hai-yan, CHEN Chuan-lin, DU Jia-lei, *et al.* Propagation of bessellaussian beam with optical vortices in turbulent atmosphere[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2013, **42**(5): 505-510.
王海燕,陈川琳,杜家磊,等. 贝塞尔高斯涡旋光束在大气湍流中的传输特性. 光子学报, 2013, **42**(5):505-510.
- [13] DHOLAKIA K, CIZMAR T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(6): 335-342.
- [14] ZHOU Ye-peng, REN Hong-liang, WANG Juan, *et al.* Comparative analysis of the trapping force using laguerre-gaussian beam and Gaussian beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1300-1304.
周业鹏,任洪亮,王娟,等. 拉盖尔-高斯光束与高斯光束捕获力比较[J]. 光子学报, 2013, **42**(11): 1300-1304.
- [15] DJORDJEVIC I B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(150): 14277-14289.
- [16] LEACH J, JACK B, ROMERO J, *et al.* Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables[J]. *Science*, 2010, **329**(5992): 662-665.
- [17] DONG Liang-wei, YE Fang-wei, WANG Jian-dong, *et al.* Interaction between optical vortices carrying opposite topological charges[J]. *Chinese Physics B*, 2004, **53**(10): 3353-3357.
董亮伟,叶芳伟,王建国,等. 带有相反拓扑指数的光学涡流间相互作用研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(10): 3353-3357.
- [18] FENG Bo, GAN Xue-tao, LIU Sheng, *et al.* Transformation of multi-edge-dislocations to screw-dislocations in optical field [J]. *Chinese Physics B*, 2011, **60**(9): 94203-94206.
冯博,甘雪涛,刘圣,等. 光波场中多边形位错向螺旋位错的转化. 物理学报, 2011, **60**(9): 94203-94206.
- [19] MAMAIEV A, SAFFMAN M, ZOZILYA A. Decay of high order optical vortices in anisotropic nonlinear optical media [J]. *Physical Review Letter*, 1997, **78**: 2108-2111.
- [20] KIMEL I, ELIAS L. Relations between Hermite and Laguerre-Gaussian modes [J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1993, **29**(9): 2562-2566.
- [21] NEIL A T, COURTIAL J. Mode transformations in terms of the constituent Hermite-Gaussian or Laguerre-Gaussian modes and the variable-phase mode converter [J]. *Optical Communication*, 2000, **181**: 35-40.