

·光学设计·

## 具有轨道角动量的空间光孤子的研究进展

寿倩

(华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510631)

**摘要:**介绍了具有轨道角动量的空间光孤子的研究进展,包括两个方面的内容:具有轨道角动量的椭圆形光束可以在各向同性介质中以孤子状态稳定传输;具有轨道角动量的光强旋转型孤子在传输材料、光束模式和光束起转方式方面的研究进展。

**关键词:**非线性;空间孤子;光学轨道角动量;旋转型空间孤子

中图分类号:O415;O471

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)03-0024-04

## Optical Spatial Solitons with Orbital Angular Momentum

SHOU Qian

(Key Laboratory of Photonic Information Technology of Guangdong Higher Education Institutes,

South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** The study on the spatial optical solitons with orbital angular momentum is introduced, which includes two contents: the elliptic beams with orbital angular momentum can propagate in the isotropic medium as a soliton; the rotating spatial solitons are studied in the transporting medium, optical mode and the rotating method.

**Key words:** nonlinear; spatial solitons; optical orbital angular momentum; rotating spatial solitons

2+1维光孤子在横截面上的旋转及其控制问题,作为全光控制的基本问题之一,一直受到人们的关注。旋转光束不仅在波动理论中显示了其与众不同的特点<sup>[1]</sup>,而且它还可以应用于诸多领域的研究,如用于激发玻色爱因斯坦凝聚<sup>[2]</sup>,充当旋转光镊<sup>[3,4]</sup>,提高成像分辨率<sup>[5]</sup>等。在非线性领域,轨道角动量带来的“离心力”增强了光束的衍射效应,避免Kerr介质中孤子的坍塌<sup>[6]</sup>。更重要的是由于离心力的大小随光束横向尺寸而变化,所以在各向同性介质中不可能存在的非圆对称的空间孤子因为有了轨道角动量而可以稳定传输<sup>[6,7]</sup>。

### 1 椭圆形空间光孤子的实现途径

空间孤子就是非线性自聚焦效应和衍射效应

平衡时光束稳定传输的一种状态。一般来说衍射效应与光束束宽相关,光强非对称分布(如椭圆形孤子)的光束,各个方向的衍射效应也不相同。要形成椭圆形孤子,有两个实现途径。第一,引入与之相反的线性各向异性。线性的各向异性由材料参数 $\chi^{(1)}$ 决定,它将导致衍射的各向异性。文献[8]讨论了具有线性各向异性的向列相液晶中椭圆孤子的产生。然而在大多数情况下,线性各向异性都非常弱,无法把光束各个方向束宽不同带来的衍射的各向异性完全“矫正”。第二,引入与之相同的非线性的各向异性去平衡衍射。非线性的各向异性由材料参数 $\chi^{(3)}$ 和边界条件共同决定。具有 $\chi^{(3)}$ 各向异性的饱和吸收的光折变晶体可以支持椭圆形孤子<sup>[9]</sup>;而在 $\chi^{(3)}$ 各向同性的强非局域铅玻璃介质中,有限的矩形边界也将导致椭圆孤子的形成<sup>[10]</sup>,

收稿日期:2011-04-11

基金项目:国家自然科学基金(60908003)

作者简介:寿倩(1978-),女,河南开封人,光学博士,讲师,主要从事非局域空间光孤子方面的研究。

如图1所示。一般认为,各向同性的无界体介质中,椭圆形光束在长轴或短轴上的束宽必将经历周期性的振荡,无法形成稳定的孤子<sup>[11]</sup>。

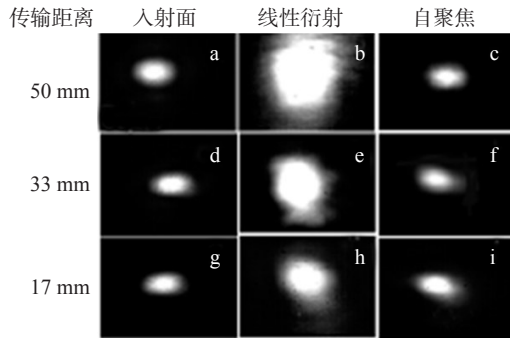


图1 铅玻璃中椭圆孤子的形成

怎样才能在各向同性的无界体介质中得到椭圆形孤子呢?当椭圆形光束携带了光学轨道角动量时,轨道角动量带来的离心力不仅可以使光束免于自聚焦导致的“坍塌”,对于以固定速度旋转的椭圆形光束,各向异性的离心力甚至可以支持旋转椭圆孤子的稳定传输<sup>[6]</sup>。与来自光的圆偏振特性的自旋角动量不同,轨道角动量来自相位面的螺旋形(后来Deng证明也不尽然,详见下文)结构<sup>[12, 13]</sup>。具有轨道角动量的光束,其Poynting矢量具有角向分量,就会导致沿光传输方向的轨道角动量的产生<sup>[12]</sup>。拉盖尔高斯光束是最早确认的具有轨道角动量的光束<sup>[12, 13]</sup>。后来各种形式携带光学涡旋的光束成为了轨道角动量最重要的一类载体<sup>[14, 15]</sup>。但是具有轨道角动量的光束不一定是旋转光束。因为有轨道角动量,就有能量的流动,但是光强并不一定重新分布,即Poynting矢量的散度可能为零。

## 2 光强旋转的空间光孤子的研究进展

近几年人们更关注光强在横向面上旋转的光束(而不是单单具有轨道角动量)。2001年以后在非线形领域,人们研究了旋转型孤子的形成<sup>[6, 7, 15-19]</sup>。Carmon等人首先以可饱和的光折变晶体为传输介质,实验得到了两瓣的旋转型孤子<sup>[16]</sup>,如图2所示。其中光束的轨道角动量由螺旋型相位板提供。Zhang等人可在饱和的Kerr介质中将角动量从叠加并相对移动的光栅形成的旋转摩尔条纹传递给高斯光束,观测到了旋转的螺旋推进器型孤子<sup>[17]</sup>,如

图3所示。Desyatnikov等人可在饱和的Kerr介质中理论预言了在一个环上分布的孤子旋转阵列<sup>[18]</sup>。

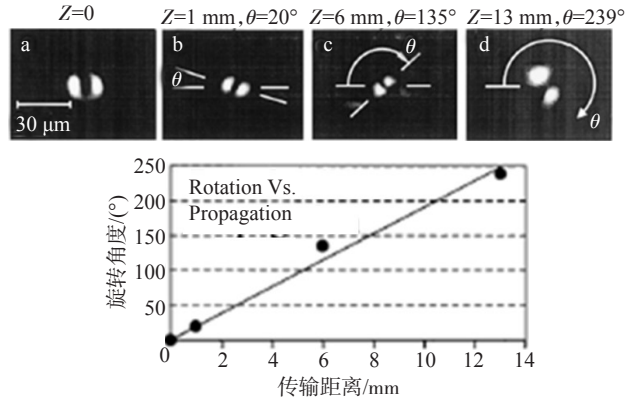


图2 可饱和的光折变晶体中的两瓣的旋转型孤子

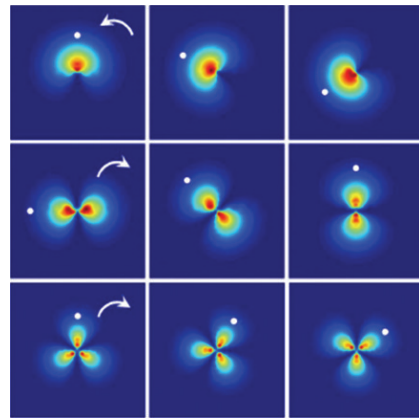


图3 可饱和的光折变晶体中的螺旋推进器型孤子

非局域介质的提出更是为旋转孤子提供了更稳定的传输介质。自从Snyder和Mitchell 1997年发表在Science上的文章<sup>[20]</sup>所提出之后,强非局域空间光孤子一直都是一个研究热点<sup>[21-31]</sup>。由于非局域孤子的束宽远小于材料响应函数的特征宽度<sup>[21]</sup>,这种孤子的形成大大降低了空间和相位方面的要求,2+1维的基态孤子甚至是高阶孤子<sup>[22-25]</sup>、矢量孤子<sup>[26, 27]</sup>、涡旋孤子<sup>[28, 29]</sup>以及非相干孤子<sup>[30, 31]</sup>都可以稳定传输。这些有着复杂横向空间模式的光孤子引发更加丰富的光、光相互作用模式。特别是当光学轨道角动量独立于自旋角动量被Allen等人证实以后<sup>[32]</sup>,非局域介质中的旋转孤子成为非局域孤子的新研究热点。

Ince高斯是既厄密高斯和拉盖尔高斯之后发现的强非局域介质中孤子的精确解<sup>[24]</sup>。涡旋Ince高斯(即偶模和奇模Ince高斯的线性叠加)的线性叠加也会产生旋转的环状孤子<sup>[15]</sup>。Ye等人可在强非局

域液晶材料中数值模拟了旋转的双极孤子<sup>[19]</sup>。一般认为,光束具有轨道角动量的必要条件是其光场可以写为: $u(r, \varphi, z) = u_0(r, z)\exp(il\varphi)$ ,即相位具有螺旋型结构<sup>[12]</sup>。Deng 等人在强非局域 Snyder-Mitchell 模型下理论预言了不携带涡旋的虚宗量的旋转型孤子<sup>[7]</sup>,提出只要光束复振幅的相位项中含有  $xy$  ( $xy$  为光束的横向坐标) 这一交叉项,光束就会具有轨道角动量的观点,预言了旋转椭圆孤子,如图4所示。然而 Deng 等人理论预言的强非局域介质中的旋转型孤子是基于 Snyder-Mitchell 模型<sup>[20]</sup>,其响应函数是无奇性的高斯型,而目前发现的强非局域介质-液晶和铅玻璃中的响应函数都是有奇性的<sup>[10, 33-35]</sup>。因此此模型并不是描述液晶和铅玻璃中非局域非线性传输方程的准确模型。Desyatnikov 等人在理论上得到了椭圆高斯形旋转孤子<sup>[6]</sup>,如图5所示。图5中  $w_x, w_y$  分别是横向方向上的2个束宽。虽然还是在饱和型 Kerr 介质中来研究,但是他们的椭圆高斯形旋转孤子同样不携带涡旋。特别值得注意的是,其光束的角动量来自于光轴与椭圆长轴(或短轴)成夹角放置的柱透镜<sup>[36]</sup>,这种光束的起转方法具有简单易行、能产生很高并且可调谐的轨道角动量的优点,也为 Deng 的虚宗量的旋转模型找到一条实现的途径。大数值孔径的圆形透镜和柱透镜曾经分别用来作为自旋角动量和轨道角动量之间的转换器<sup>[37]</sup>和厄米高斯光束转换成拉盖尔高斯光束的模式转换器<sup>[38]</sup>。

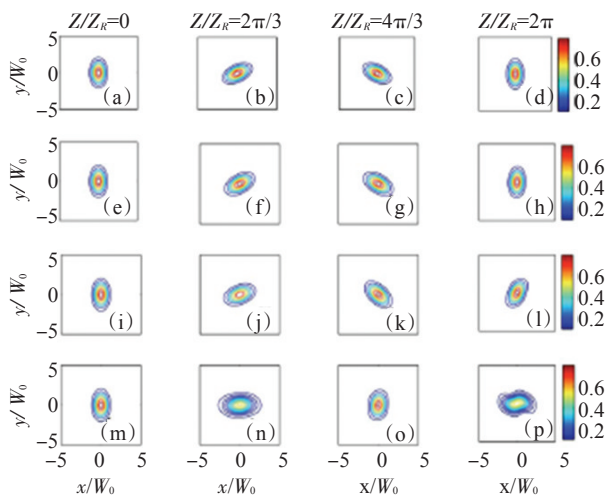


图4 Snyder-Mitchell 模型下理论预言的不携带涡旋的虚宗量的旋转型孤子

目前,有很多技术方法实现了光束的旋转,如

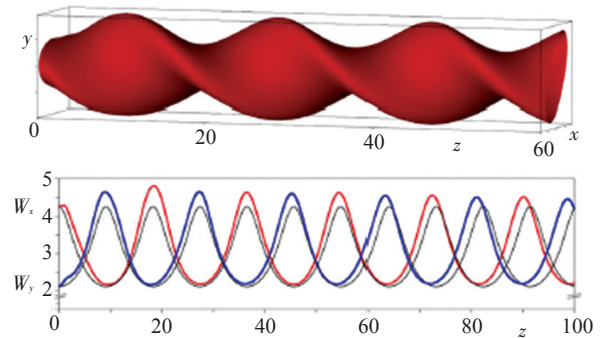


图5 饱和型 Kerr 介质中椭圆高斯形旋转孤子

利用旋转镜<sup>[39]</sup>、旋转光阑<sup>[36]</sup>甚至是旋转的贝塞尔晶格<sup>[40]</sup>,利用拉盖尔高斯模或者贝塞尔光束的光学干涉效应<sup>[41, 42]</sup>,计算机全息技术 CGH<sup>[43]</sup>、二元相位衍射元件<sup>[44]</sup>和 moire 技术<sup>[17]</sup>等,甚至是一些机械的旋转元件<sup>[39, 45]</sup>。

### 3 结论

具有光学轨道角动量的光学孤子,在其内部存在能流的流动,因而具有一些引人瞩目的性质。首先角动量的引入使各向同性介质中实现椭圆形孤子成为可能,其次,特别的对于光强旋转型的光束,更是可以形成具有复杂空间及相位分布的空间孤子。在介质方面,旋转型孤子大部分的研究针对可饱和的 Kerr 介质,非局域旋转孤子的研究起步较晚,而且多集中在理论方面,其非局域响应是唯像的高斯型模型;在光束形状方面,主要集中在空间分布形状较为复杂的孤子,如多瓣状、螺旋推进器状的孤子<sup>[16, 17]</sup>,或者是有光强零点即携带相位涡旋的环形或扁环形光束,如涡旋 Ince 高斯<sup>[14, 15]</sup>等;总旋转光场经常是几个独立光场的叠加<sup>[16, 18]</sup>;另外,赋予光束角动量的方法较复杂,一般要借助于机械的旋转装置或者工艺复杂的衍射元件。

### 参考文献

- [1] Jarutis V, Matijosius A, Trapani P D, et al. Spiraling zero-order Bessel beam[J]. Opt. Lett., 2009, 34 (14) : 2129-2131.
- [2] Madison K W, Chevy F, Wohlleben W, et al. Vortex formation in a stirred Bose-Einstein condensate[J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 84(5) : 806-809.
- [3] Paterson L, MacDonald M P, Jarlt, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. Science, 2001, 292(5518) : 912-914.

- [4] MacDonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. *Science*, 2002, 296(5570):1101–1103.
- [5] Greengard A, Schechner Y Y, Piestun R. Depth from diffracted rotation[J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(2):181–183.
- [6] Desyatnikov A S, Bucckliero D, Dennis M R, et al. Suppression of collapse for spiralling elliptic solitons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104(5):053902–4.
- [7] Deng D M, Guo Q, Hu W. Mode purities of Laguerre–Gaussian beams generated via complex-amplitude modulation using phase-only spatial light modulators[J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(1):43–45.
- [8] Conti C, Oecianti M, Assanto G. Spatial solitons and modulational instability in the presence of large birefringence: The case of highly nonlocal liquid crystals[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 72(6):066614–4.
- [9] Zhang P, Zhao J L, Lou C, et al. Elliptical solitons in nonconventionally biased photorefractive crystals[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(2):536–544.
- [10] Rotschild C, Cohen O, Manela O, et al. Solitons in nonlinear media with a infinite range of nonlocality: first observation of coherent elliptic solitons and of vortex-ring solitons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(21):213904–4.
- [11] Wang X H, Guo Q. The propagation properties of the elliptic Gaussian beam in strongly nonlocal nonlinear media[J]. *Acta. Phys. Sin.*, 2005, 54(7):3183–3188 (in Chinese).
- [12] Franke–Arnold S, Allen L, Padgett M. Advances in optical angular momentum[J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2008, 1–15.
- [13] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons[J]. *Nat. Phys.*, 2007, 3:305–310.
- [14] Deng D M, Guo Q. Ince–Gaussian beams in strongly nonlocal nonlinear media[J]. *J. Phys. B*, 2008, 41(14):145401.
- [15] Lopez-Aguayo S, Gutierrez-Vega J C. Elliptically modulated self-trapped singular beams in nonlocal nonlinear media: ellipticons[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(26):18326–18338.
- [16] Carmon T, Uzdin R, Pigier C, et al. Rotating propeller solitons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(14):143901–4.
- [17] Zhang P, Huang S, Hu Y, et al. Generation and nonlinear self-trapping of optical propelling beams[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(18):3129–3131.
- [18] Desyatnikov A S, Kivshar Y S. Rotating optical soliton clusters[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(5):053901–4.
- [19] Ye F, Kartashov Y V, Torner L. Enhanced soliton interactions by inhomogeneous nonlocality and nonlinearity[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, 76(3):033812–5.
- [20] Snyder A W, Mitchell D J. Accessible solitons[J]. *Science*, 1997, 276:1538–1541.
- [21] Bang O, Krolikowski W, Wyller W, et al. Modulational instability in nonlocal nonlinear kerr media[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, 64(1):016612–8.
- [22] Rotschild C, Segev M, Xu Z Y, et al. Two dimensional multipole solitons in nonlocal nonlinear media[J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(22):3312–3314.
- [23] Deng D M, Zhao X, Guo Q. Hermite–Gaussian breathers and solitons in strongly nonlocal nonlinear media[J]. *Opt. Soc. Am B*, 2007, 24(9):2537–2555.
- [24] Deng D M, Guo Q. Ince-Gaussian solitons in strongly nonlocal nonlinear media[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(21):3206–3208.
- [25] Zhang X P, Guo Q. Analytical solution in the Hermite–Gaussian form of the beam propagating in the strong nonlocal media[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2005, 54(7):3178–3182 (in Chinese).
- [26] Garcia-Ripoll J J, Perez-Garcia V M, Ostrovskaya E A, et al. Dipole-Mode Vector Solitons. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(1):82–85.
- [27] Delque M, Sylvestre T, Maillotte H. Experimental observation of the elliptically polarized fundamental vector soliton of isotropic Kerr media[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(24):3383–3385.
- [28] Zhang X P, Guo Q, Hu W. Analytical solution to the spatial optical solitons propagating in the strong nonlocal media[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2005, 54(11):5189–5193 (in Chinese).
- [29] Rotschild C, Cohen O, Manela O, et al. Solitons in nonlinear media with a infinite range of nonlocality: first observation of coherent elliptic solitons and of vortex-ring solitons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(21):213904–4.
- [30] Rotschild C, Schwartz T, Cohen O, et al. Incoherent spatial solitons in effectively instantaneous nonlinear media[J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2:371–376.
- [31] Barak A, Rotschild C, Alfassi B, et al. Random-phase surface-wave solitons in nonlocal nonlinear media[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(16):2450–2452.
- [32] 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.

(下转第56页)



表1 无驱动结构硅微机械陀螺达到的性能指标

性能参数	达到指标
滚动角速度/(r/s)	1~40
俯仰和偏航角速度/(°/s)	500
分辨率/(°/s)	≤0.001
非线性度/(FS)	≤1%
零位漂移/(°/s/h)	≤0.01
工作温度/(°C)	-40~85
外形尺寸/mm	≤22×22×5
质量/g	≤8

输出特性,可以通过硬件电路和软件算法及补偿技术,将载体的滚动、俯仰和偏航的三维姿态角速度信号同时提取出来,经过处理后输出给系统以实现旋转载体在运动过程中的姿态检测和控制。已经研制成功CJS-DR-WB01型硅微机械陀螺,图8是实用产品的照片。该陀螺具有结构简单、可靠性高、抗震能力强、响应时间短、成本低等特点,可广泛用于石油钻井(钻头)、汽车(轮胎)的姿态检测与控制系统。

### 参考文献

[1] 鲍敏杭. 微机械陀螺进展[J]. 世界产品与技术, 2000, 20(10): 20-22.

(上接第27页)

- [33] Shou Q, Jiang Q, Guo Q. The closed-form solution for the 2D Poisson equation with a rectangular boundary[J]. J. Phys. A, 2009, 42(20): 205202-7.
- [34] Shou Q, Liang Y B, Jiang Q, et al. Boundary force exerted on spatial solitons in cylindrical strongly nonlocal media[J]. Opt. Lett., 2009, 34(22): 3523-3525.
- [35] Hu W, Zhang T, Guo Q. Nonlocality-controlled interaction of spatial solitons in nematic liquid crystals[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(7): 071111-3.
- [36] Courtial J, Dholakia K, Allen L, et al. Gaussian beams with very high orbital angular momentum[J]. Opt. Commun., 1997, 144: 210-213.
- [37] Zhao Y Q, Edgar J S, Jeffries G D M, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam[J]. Phys. Rev. Lett., 2007, 99(7): 073901-4.
- [38] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. Opt. Commun., 1993, 96: 123-132.

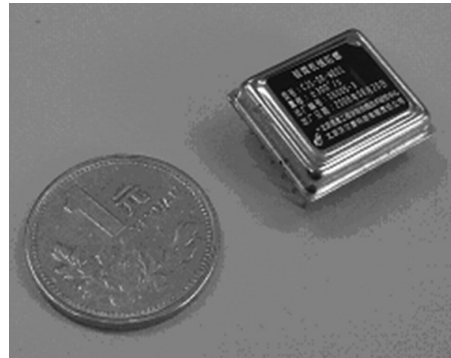


图8 硅微机械陀螺照片

- [2] 李新刚,袁建平. 微机械陀螺的发展现状[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 289-301.
- [3] Zhang Fuxue. THE STRUCTURE PRINCIPLE OF SILICON MICROMACHINED GYROSCOPE DRIVEN BY THE ROTATING CARRIER[J]. International Journal of Information Acquisition, 2005, 2(3): 203-216.
- [4] 傅建国,王孝通,李博,等. MEMS陀螺随机误差模型研究[J]. 传感器技术, 2005, 24(3): 75-77.
- [5] 张智永,范大棚,李凯,等. 微机电陀螺零点漂移数据滤波方法的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 69-71.
- [6] 陈永,焦继伟,王惠泉,等. 大气下工作的微机械陀螺器的设计及其噪声特性[J]. 半导体学报, 2005, 26(1): 148-152.
- [39] Rotschild C, Saraf M, Barak A, et al. Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008), paper FME2.
- [40] Kartashov Y Y, Vysloukh V A, Torner L. Soliton spiraling in optically induced rotating Bessel lattices[J]. Opt. Lett., 2005, 30(6): 637-639.
- [41] Jarutis V, Matijosius A, Trapani P D, et al. Spiraling zero-order Bessel beam[J]. Opt. Lett., 2009, 34: 2129-2131.
- [42] Paterson L, MacDonald M P, Volke-Sepulveda K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures [J]. Science, 2002, 296(5570): 1101-1103.
- [43] Paterson C, Smith R. Helicon waves: propagation-invariant waves in a rotating coordinate system[J]. Opt. Commun., 1996, 124(1-2): 131-140.
- [44] Paakkonen P, Lautanen J, Honkanen M, et al. Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics[J]. J. Mod. Opt., 1998, 45: 2355-2369.
- [45] Anastassiou C, Pigier C, Segev M, et al. Self-trapping of bright rings[J]. Opt. Lett., 2001, 26(12): 911-913.