

幂指数相位涡旋光束用于微粒操控

罗 伟¹ 程书博¹ 袁战忠¹ 陶少华^{1,2}

(¹ 中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083
² 中南大学超微结构与超快过程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要 实验验证了一种利用幂指数相位涡旋光束(PEPV)操控微粒的方法。该方法基于幂指数相位涡旋光束理论,产生不同拓扑荷数与方位角幂指数大于1的涡旋光场的相位全息图,并将该全息片经计算机输入到空间光调制器(SLM)上用于调制入射激光光束。利用透镜对被调制光束进行傅里叶变换,利用光阑在频域对衍射光斑进行筛选和过滤,并利用倒置高倍光学显微镜将光束成像于载物台样品上。利用该幂指数相位涡旋光束对微米级粒子实现了定向光学输运。研究表明,该光束在粒子的定向输运与收集方面有独特的功能,将进一步拓展光学涡旋光束的实际应用范围。

关键词 光学设计;光学涡旋;衍射;空间光调制器;全息光镊

中图分类号 O438; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1109001

Power-Exponent-Phase Vortices for Manipulating Particles

Luo Wei¹ Cheng Shubo¹ Yuan Zhanzhong¹ Tao Shaohua^{1,2}

¹ School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China
² Hunan Key Laboratory of Super Microstructure and Ultrafast Process, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

Abstract An approach of manipulating micro-particles based on the theory of power-exponent-phase vortices (PEPV) is demonstrated experimentally. Phase holograms are generated to produce PEPVs with different topological charges and exponential powers. The holograms are displayed sequentially on a spatial light modulator (SLM) for modulating the incident laser beam. The modulated light beam is Fourier transformed by a lens, and then filtered by a pinhole. The selected diffraction order of the beam is focused on the sample stage of an inverted optical microscope. The experimental results verify that the PEPV beam can be used to optically transport micron-sized particles directionally. The beam is found to possess a unique function in the transportation and collection of micro-particles, and can have extensive practical applications in many fields.

Key words optical design; optical vortex; spatial light modulator; diffraction; holographic optical tweezers

OCIS codes 070.6120; 090.1760; 090.1970; 090.2870; 090.2890

1 引 言

涡旋光束又称螺旋光束,是具有连续螺旋状相位波前且涡旋中心光强为零的奇异光束。随着科技的发展,涡旋光束的应用越来越广泛。1995年,He等^[1]观察到涡旋光束中轨道角动量向粒子的传递,实现了光学涡旋光束对粒子的旋转操控。光学涡旋场具有的特殊的螺旋波前和光子轨道角动量特性,

通过光学涡旋场中光子轨道角动量对原子、分子、胶体颗粒等物质的传递,可以实现对微观粒子的无接触、无损伤的操纵^[2-4],同时,涡旋光束所拥有的轨道角动量还可用于自由空间光通信的信息解码^[5-6]。光学涡旋的拓扑荷数在量子计算、量子信息传输以及量子保密通信等领域也具有重要的潜在应用价值,可以作为信息处理和光学计算的一种新

收稿日期: 2014-06-27; **收到修改稿日期**: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61178017)、湖南省自然科学基金重点项目(11JJ2039)

作者简介: 罗 伟(1988—),男,硕士研究生,主要从事光镊技术及其应用方面的研究。E-mail: 464342094@qq.com

导师简介: 陶少华(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光学信息处理方面的研究。

E-mail: eshtao@csu.edu.cn(通信联系人)

手段^[7-8]。近年来,涡旋光束受到人们越来越多的关注,产生的光学涡旋光束^[9-14]的种类也很多,特别地,文献[9]提出了一种新型的光学涡旋光束—幂指数相位涡旋光束(PEPV)。它的相位是由幂指数与拓扑荷数来决定的,随着幂指数的增大,光束的强度分布更加集中;增大光斑的拓扑荷数,其螺旋形状不会改变,但光斑会变大。与传统的涡旋光束相比,PEPV是一条不闭合的曲线;与文献[10]中的分数阶涡旋光束相比,其输运微粒的起点与终点之间的间距可能会更长。

文献[9]介绍了如何理论产生,模拟仿真该光束,但没有实验验证光束在微粒操控中的应用。本文基于全息光镊系统,利用液晶空间光调制器(SLM)和倒置高倍光学显微镜验证了这种新型的光学涡旋光束是否具有典型涡旋光束操控微粒的特性。

2 幂指数相位涡旋光束基本理论及模拟结果

目前实验产生光学涡旋光束的理论和方法很多,但是所用到的光学涡旋光束是一种新型的非典型的光学涡旋 PEPV,其相位函数的表达式为^[9]

$$\psi = 2\pi m \left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^n, \quad (1)$$

式中 m 表示涡旋光的拓扑荷数,它的正负决定了微

粒运动方向, θ 为方位角,范围为 $0 \sim 2\pi$, n 是决定螺旋阶段的幂阶,可以是整数或分数。当 $n=1$ 时,PEPV 的相位函数的表达式跟典型的光学涡旋光束的相位表达式一样。

根据(1)式中产生 PEPV 的相位表达式,在 Matlab 中进行编程,画出相应的相位全息图,其中,拓扑荷数与幂阶取值不同的相位全息图就会产生不同的 PEPV 涡旋光束。这里选取了四组值来产生 PEPV 的全息图,如图 1(a)~(d)所示,光束所对应的拓扑荷数与幂指数分别为 8 和 2、12 和 2、30 和 2、-30 和 2。全息图的分辨率都为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。需要指出的是,图 1 中的全息图均叠加了一个闪耀光栅相位,用于将成像后的 PEPV 光斑偏转到实验中指定的位置出现。另外,选取的拓扑荷数与幂指数分别为 8 和 2、12 和 2 两组 PEPV 是为了使实验产生的光场方便同文献[10]中的模拟结果相比较,而选取拓扑荷数与幂指数分别为 30 和 2、-30 和 2 的两组 PEPV 全息是考虑到光斑大小需与实验所用粒子的粒径相匹配以及光斑操控微粒的轨道角动量大小和方向等因素。

将图 1 中的这四幅全息图分别加载到 SLM 上,利用 SLM 对入射的光波进行相位调制,然后对光波进行傅里叶变换即可得到所对应的涡旋光场,其对应的光场强度分布如图 2(a)~(d)所示。

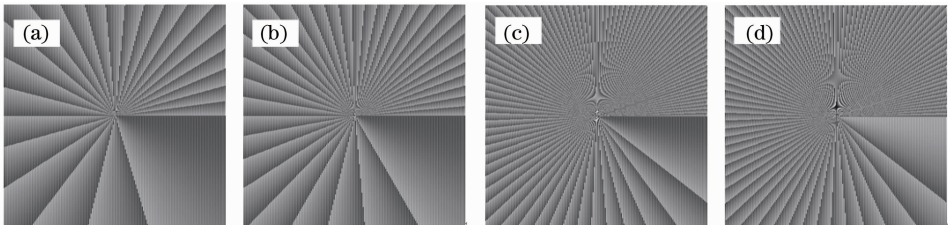


图 1 产生 PEPV 光束的全息图,其拓扑荷数与幂阶分别为(a) $m=8, n=2$; (b) $m=12, n=2$; (c) $m=30, n=2$; (d) $m=-30, n=2$

Fig. 1 Holograms for the generation of PEPVs with topological charges and exponential powers of (a) $m=8, n=2$; (b) $m=12, n=2$; (c) $m=30, n=2$, and (d) $m=-30, n=2$, respectively

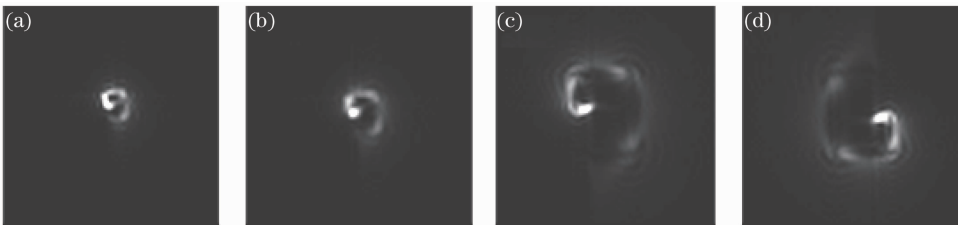


图 2 PEPV 光束的模拟光强分布图。光束的拓扑荷数与幂阶分别为 (a) $m=8, n=2$; (b) $m=12, n=2$; (c) $m=30, n=2$; (d) $m=-30, n=2$

Fig. 2 Simulated intensity distributions of the PEPVs with topological charges and exponential powers of (a) $m=8, n=2$; (b) $m=12, n=2$; (c) $m=30, n=2$, and (d) $m=-30, n=2$, respectively

由图 2(a)和(b)两幅图对比可以得知当幂指数不变时,拓扑荷数越大,涡旋的轨迹范围越广;由图 2(c)和(d)两幅图对比可以得知当幂指数不变时,拓扑荷数值的符号决定涡旋光束光斑的形状。

3 实验及结果

为了实验验证上述 PEPV 光束的光场分布及其对微粒的操控行为,搭建了相应的实验系统。系统的光路图和实物图分别如图 3 和图 4 所示。图 3 中的 1 表示激光器,2 表示凸透镜,3 表示凸透镜,4 表示 SLM,5 表示凸透镜,6 表示光阑,7 表示凸透镜,8 表示倒置光学显微镜。图 4 中的 1 表示激光器,2 表示 $f=5\text{ cm}$ 的凸透镜,3 表示 $f=40\text{ cm}$ 的凸透镜,4 表示 SLM,5 表示 $f=25\text{ cm}$ 的凸透镜,6 表示光阑,7 表示 $f=25\text{ cm}$ 的凸透镜,8 表示倒置光学显微镜,透镜 2 到透镜 3 的距离为 45 cm ,空间光调制器到透镜 5 的距离为 45 cm ,透镜 5 到透镜 7 的距离为 50 cm ,实验光路图中虚线及箭头表示激光光路方向。

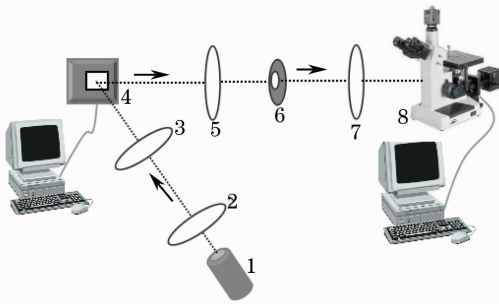


图 3 实验光路图

Fig. 3 Schematic configuration of the experimental setup

1 W,且连续可调,波长为 532 nm 。实验中,光由激光器发出,经由 2 个透镜所组成的望远系统扩束后,入射到 SLM 上。将第二部分所产生的全息图载入并显示到 SLM 液晶屏上。被 SLM 调制的激光光束射入到透镜上,由透镜进行傅里叶变换。注意,SLM 并没有放置在透镜 5 的前焦面上,导致在该透镜的后焦面上的成像光斑会叠加一个与传播距离有关的二次相位因子。聚焦光束通过圆孔光阑时,只有指定的衍射级次的光斑通过。最后,经过一个长焦透镜和显微镜系统使光斑成像在显微镜载物台样品上。实验中使用的倒置高倍光学显微镜为奥林巴斯公司生产的型号为 IX71 的荧光显微镜,自带照明光源和 CCD 图像传感器。显微镜物镜为油浸型,放大倍数为 100 倍。连接显微镜的计算机用于处理和显示 CCD 传输的图像与视频。

实验中所采用的样品是直径为 $3\text{ }\mu\text{ m}$ 的聚苯乙烯小球。由于原装聚苯乙烯小球溶液非常粘稠,使用时必须将其稀释。用胶头滴管吸取少量聚苯乙烯小球溶液到培养池中,再用去离子水稀释后待用。微粒在稀释后的溶液中不易聚集成团且布朗运动明显。用中间带圆孔的贴纸粘在 0.5 mm 厚的载玻片表面,粘贴纸的厚度约 $200\text{ }\mu\text{ m}$ 。将样品溶液滴入圆孔区域里面,待其均匀铺开后再盖上盖玻片。

将样品放到图 4 所示的全息光镊系统的载物台上,选取显微镜的 100 倍物镜和激发模块 4(只让样品台上成像光斑的部分光反射进入到 CCD 中)方便观察成像光斑。将图 1 所示的全息图分别读入到 SLM,微调透镜 5 后,利用光束质量分析仪在该透镜焦面上所采集到的 PEPV 光斑如图 5 所示。

图 5(a)为 $m=8, n=2$ 的 PEPV 光斑图,图 5(b)为 $m=12, n=2$ 的 PEPV 光斑图。图中部分光斑出现分段的原因是因为杂散光与 PEPV 光束发生干涉而造成的。图 5(c)为 $m=30, n=2$ 的 PEPV 光斑图,图 5(d)为 $m=-30, n=2$ 的 PEPV 光斑图。图 5 中的实线箭头代表涡旋光束轨道角动量的旋转方向。

最后将 IX71 显微镜的激发模块 4 旋转到激发模块 2(让光束全透过并照射到样品台的光学元件组合,其目的是不让激光反射进入到 CCD 中),调大激光器功率至 700 mW 左右,就可以看到聚苯乙烯小球按照图 5(c)和(d)中所示的光斑轨迹运动,切换图 5(c)和(d),即拓扑荷数的符号发生改变,小球的运动方向也会随之改变。图 6 和图 7 所示的就是聚苯乙烯小球被不同的 PEPV 光束驱动而运动的

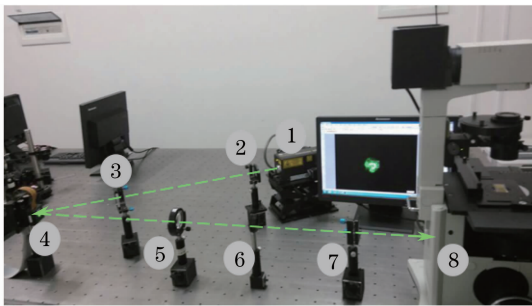


图 4 实验光路图

Fig. 4 Experimental setup

使用的 SLM 为 BNS 公司生产的型号为 XY phase series SLM 的纯相位空间光调制器,SLM 分辨率为 $512\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$,且每个像素为边长是 $15\text{ }\mu\text{ m}$ 的正方形。激光器是 Coherent 公司生产的,型号为 Genesis MX532-1000 STM,最大功率为

轨迹。图 6 中所用的 PEPV 参数为 $m = 30, n = 2$, 微粒运动的方向为逆时针, 图 7 中所用的 PEPV 参

数为 $m = -30, n = 2$, 微粒运动的方向为顺时针。

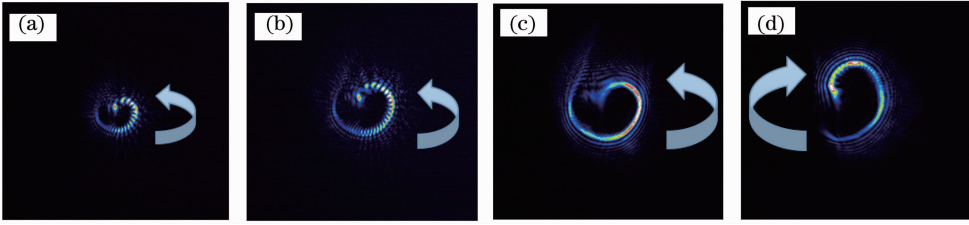


图 5 CCD 采集的不同参数值的 PEPV 光斑图。(a) $m = 8, n = 2$; (b) $m = 12, n = 2$; (c) $m = 30, n = 2$; (d) $m = -30, n = 2$ 。实线箭头代表涡旋光束轨道角动量的旋转方向

Fig. 5 CCD captured PEPVs of different topological charges and powers of (a) $m = 8, n = 2$, (b) $m = 12, n = 2$, (c) $m = 30, n = 2$, and (d) $m = -30, n = 2$, respectively. The arrows represent the directions of the orbital angular momentums of the beams

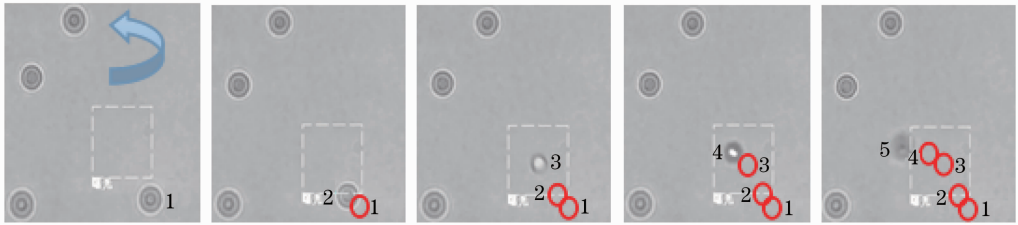


图 6 微粒在 $m = 30, n = 2$ 的 PEPV 光斑里的运动轨迹。实线箭头代表微粒运动的方向, 数字 1, 2, 3, 4, 5 代表微粒不同时间所在的不同位置。白色虚线方框代表光斑所在的位置

Fig. 6 Trajectory of polystyrene spheres driven by the PEPV beam of $m = 30$ and $n = 2$. The arrow represents the movement direction of the trapped particle, and numbers 1, 2, 3, 4, and 5 represent the positions of the captured particle at different time. The dashed box represents the region of the focused beam

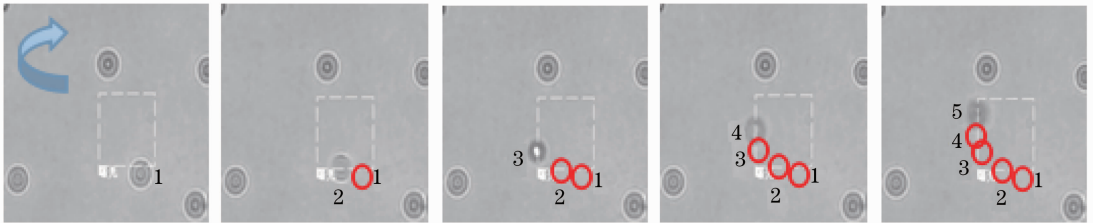


图 7 微粒在 $m = -30, n = 2$ 的 PEPV 光斑里的运动轨迹。实线箭头代表微粒运动的方向, 数字 1, 2, 3, 4, 5 代表微粒不同时间所在的不同位置。白色虚线方框代表光斑所在的位置

Fig. 7 Trajectory of polystyrene spheres driven by the PEPV beam with $m = -30$ and $n = 2$. The arrow represents the movement direction of the trapped particle, and numbers 1, 2, 3, 4, and 5 represent the positions of the captured particle at different time. The dashed box represents the region of the focused beam

图 6 和图 7 中实线箭头代表微粒运动的方向, 数字 1, 2, 3, 4, 5 代表被捕获的微粒在不同时间所在的不同位置, 虚线方框代表聚焦光斑所在的位置。当通过移动载物台将微粒移动到虚线框下方时(即聚焦光斑的下方), 虚线方框下方周围的微粒都会沿着 PEPV 光斑轨迹从 1 号位置连续运动到 5 号位置。

从图 6 和图 7 中可以清晰地看到聚苯乙烯小球运动的轨迹基本上跟图 5(c)和(d)所示的光斑图一致。图 6 中微粒运动的轨迹方向与图 7 中的轨迹方

向刚好相反, 说明了拓扑荷数符号不同时, 微粒运动的轨迹方向也不同。微粒最后在视野中变得模糊, 是由于此时 PEPV 光斑跟微粒不在同一个平面所致。从图 6 中可以看到单个微粒从 1 号位置连续运动到 5 号位置的情况, 为逆时针运动方向; 图 7 显示单个微粒在不同时间按顺序从 1 号位置连续运动到 5 号位置的情况, 为顺时针运动方向。图中微粒的运动轨迹充分说明了微粒可沿着 PEPV 光斑轨迹定向运动。

PEPV 光束定向运输微米级粒子的独特功能可

以应用到微流体领域以实现微粒的定向输运,如文献[10]中类似,实现微粒的定向导引。相比文献[10]中的分数阶涡旋光束,高幂阶的 PEPV 的输运位移可能更大一些。整形后的 PEPV 光场就像一个‘水泵’,可以定向地将微粒从一个区域搬运到另一个区域。由于激光对细胞,生物大分子等不造成机械损害以及污染,可以利用 PEPV 光束操控细胞或生物大分子周围的微粒,使微粒按照 PEPV 光斑的轨迹运动,这种方法特别适合一些生命力弱,体积小的生物体收集。此方法还可以应用在化学领域,通过改变 PEPV 光斑的参数来操控不同大小的微粒,使光斑周围的分子按照 PEPV 光斑轨迹运动,并通过反应通道进行化学反应。

4 结 论

基于 SLM 对高斯光束的波前进行相位调制,实验产生了不同拓扑荷数和幂指数的 PEPV 光束,并实验证实了 PEPV 对微米级粒子的定向输运操控。PEPV 光束驱动微粒旋转移动的功能可以使不同形状和折射率的微粒分别定向输运和收集,此外,通过改变光束的功率、拓扑荷数及幂指数等参数可以控制微粒的旋转方向及速度。基于 PEPV 光束的这些特点,相信未来对该光束的研究会受到越来越多关注,并可能开拓与其他领域技术相结合的更多应用。

参 考 文 献

- 1 H He, M E J Friese, N R Heckenberg, *et al.*. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75 (5): 826–829.
- 2 A M Yao, M J Padgett. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Adv Opt Photon*, 2011, 3(2): 161–204.

- 3 K Ladavac, D G Grier. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays [J]. *Opt Express*, 2004, 12(6): 1144–1149.
- 4 M Dienerowitz, M Mazilu, P J Reece, *et al.*. Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles [J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4991–4999.
- 5 G Gibson, J Courtial, M J Padgett, *et al.*. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Opt Express*, 2004, 12(22): 5448–5456.
- 6 Guo Jianjun, Guo Banghong, Cheng Guangming, *et al.*. Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080003. 郭建军, 郭邦红, 程广明, 等. 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080003.
- 7 S F Arnold, S M Barnett, E Yao, *et al.*. Uncertainty principle for angular position and angular momentum [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(1): 103.
- 8 Z Bouchal, R Celechovsky. Mixed vortex states of light as information carriers [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(1): 131.
- 9 Peng Li, Sheng Liu, Tao Peng, *et al.*. Spiral autofocusing Airy beams carrying power-exponent-phase vortices [J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 7598–7606.
- 10 S H Tao, X C Yuan, J Lin, *et al.*. Fractional optical vortex beam induced rotation of particles [J]. *Opt Express*, 2005, 13 (20): 7726–7731.
- 11 S H Tao, W M Lee, X C Yuan. Dynamic optical manipulation with a higher-order fractional Bessel beam generated from a spatial light modulator [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(20): 1867–1869.
- 12 C A Alonzo, P J Rodrigo, J Glückstad. Helico-conical optical beams: a product of helical and conical phase fronts [J]. *Opt Express*, 2005, 13(5): 1749–1760.
- 13 Li Hailian, Yang Dexing, Ren Xiaoyuan, *et al.*. Experimental investigation of optical vortex generated by volume holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 503–507. 李海莲, 杨德兴, 任小元, 等. 体全息产生光学涡旋的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 503–507.
- 14 Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang, *et al.*. Optical vortex beams and optical vortices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(1): 50–56. 陆璇辉, 黄慧琴, 赵承良, 等. 涡旋光束和光学涡旋 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(1): 50–56.

栏目编辑: 何卓铭