

任意拓扑荷光学旋涡的产生及应用

步 敬^{1,3}, 张莉超², 豆秀婕², 杨 勇³, 张聿全^{2,3}, 闵长俊²

(1. 深圳大学 数学与统计学院, 广东 深圳 518060;
2. 深圳大学 纳米光子学研究中心, 广东 深圳 518060; 3. 南开大学 现代光学研究所
光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘 要: 光学旋涡在很多领域开展了广泛的研究和应用。介绍了一种基于涡旋波片的光学旋涡产出方法, 并通过波片组合的方法可以产生任意拓扑荷的光学旋涡, 该方法具有很好的灵活性。同时由于波片的透过率非常高, 实验中拓扑荷为 3 的光学旋涡的产生效率高达 93% 以上。通过干涉产生的叉形光栅叉数和方向进一步检测了产生光学旋涡的拓扑荷。利用产生的光学旋涡还进行了初步的光学操控实验, 验证了轨道角动量对于微颗粒的动态操控作用。该方法将在更多领域得到推广和应用。

关键词: 光学旋涡; 拓扑荷; 涡旋波片; 轨道角动量

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0634001

Generation and application of optical vortices with arbitrary topological charges

Bu Jing^{1,3}, Zhang Lichao², Dou Xiujie², Yang Yong³, Zhang Yuquan^{2,3}, Min Changjun²

(1. College of Mathematics and Statistics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Nanophotonics Research Centre, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. Key Laboratory of Optical Information Science & Technology,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Optical vortex (OV) has been researched and applied in various front fields. Here, a novel method, by combining vortex retarders and half waveplates, was proposed to generate OVs with arbitrary topological charges. As the optical transmissivity of the waveplates were high, the energy efficiency of OV with topological charge of 3 was still higher than 93% in experiments. Further, the interference method was employed to detect topological charges of the generated OVs, by the direction and number of forks in the fork like pattern. As last, surface plasmon polariton (SPP) field was excited by highly focused OV with topological charge of 3, and gold particles were attracted and manipulated in the plasmonic vortex field. The results demonstrate significance of such method, and it will express enormous potential in various applications.

Key words: optical vortex; topological charges; vortex retarder; orbital angular momentum

收稿日期: 2017-05-05; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61427819, 61377052, 61605117); 广东省自然科学基金(2016A030310063);

深圳大学青年教师科研启动项目; 南开大学光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题

作者简介: 步敬(1964-), 女, 实验师, 硕士, 主要从事奇点光学及器件微细加工制备方面的研究。Email: jingbu@szu.edu.cn

通讯作者: 张聿全(1986-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事奇点光场调控及光学操控方面的研究。Email: yqzhang@szu.edu.cn

0 引言

光学旋涡(OV)是一类具有螺旋型波前和轨道角动量(OAM)的特殊光场,是奇点光学的重要研究内容^[1-3]。OAM 的特征值(又称拓扑荷 l)可取任意整数,表示光学旋涡绕轴一圈其位相变化为 2π 的整数倍,每个光子携带 $l\hbar$ 的轨道角动量。光学旋涡独特的动力学特性、轨道角动量特性和拓扑结构,可以大幅提高人们对光的驾驭能力,在光学微操纵、光学显微成像、光通信、光电子学、量子信息以及远程传感等领域都有重要的研究价值^[4-9],近年来在国际上受到越来越广泛的关注。

目前,基于光学旋涡的基础科学问题主要集中在光学旋涡矢量光束的高效产生与动态调控等。经过多年发展,人们已经提出并实验验证了多种关于光学旋涡的产生和调控方法^[10-16]。波前调控是最常用的产生方式,如螺旋位相片等,但由于其本质的限制难以实现动态调控^[10]。此外,计算全息法是一种有效的产生方法。利用空间光调制器(SLM)可以方便地模拟螺旋位相模板、几何光学元件、计算全息光栅等不同的元件,进而得到所需的旋涡光场^[14]。当然,目前的 SLM 虽然具有很好的灵活性和可调控性,但其难以抑制不必要的衍射、转换效率不够高、驱动复杂、价格昂贵、单元尺寸及整体器件尺寸均较大,特别是难以处理高功率的激光束。除此之外,还有一些其他的方法,如非均匀各项异性元件、亚波长介电光栅及金属纳米天线^[12]等。

文中介绍了一种新型基于涡旋波片(VR)和半波片组合产生光学旋涡的方法,由于波片的光学透过率极高,因而具有极高的调制效率和灵活性。通过波片组合实现光学旋涡拓扑荷的自由调控,实验中实现了拓扑荷为 $\pm 1 \sim \pm 3$ 的旋涡产生,且拓扑荷为 3 的光学旋涡的产生效率仍高达 96%。此外,还将该方法推广到脉冲光学旋涡的产生,并获得了较好的效果。最后通过干涉法对产生的光学旋涡进行了检验,将产生的 OV 光束应用于表面等离子激元的激发,并开展了初步的光学操控研究。

1 光学旋涡的产生原理及实验装置

所谓涡旋波片其本质上是一种半波片,在整个

透光孔径上具有恒定的位相延迟,但快轴在整片波片上连续旋转。因而,它们对入射的偏振光产生不同的偏振图案。首先从琼斯矩阵的角度对调制产生光学涡旋的过程进行描述,顺时针变化的涡旋波片的琼斯矩阵 M 可以表示为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

圆偏振光的琼斯矩阵可表示为:

$$E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad E_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (2)$$

以右旋圆偏振光为例,经过上述调制涡旋波片后产生的光束的琼斯矩阵可表示为:

$$E_{OV-1} = M_1 E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i\varphi} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (3)$$

即产生位相面沿逆时针方向变化的拓扑荷为 -1 光学旋涡。在上述调制波片组后插入半波片后,波片组的琼斯矩阵可调制为:

$$M_1 = M_1 H_0 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \varphi_0) & \sin(\varphi + \varphi_0) \\ \sin(\varphi + \varphi_0) & -\cos(\varphi + \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: H_0 表示快轴沿水平方向的半波片,琼斯矩阵表示为:

$$H_0 = \begin{bmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ \sin 2\phi & -\cos 2\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

此时,入射右旋圆偏光被调制为:

$$E_{OV-1} = M_1 E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\varphi} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (6)$$

即产生位相面沿顺时针方向变化的拓扑荷为 1 光学旋涡。同样地,要产生逆时针变化的拓扑荷为 1 的光学旋涡,需要调制波片组的琼斯矩阵 M 表示为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos(l\varphi + \varphi_0) & -\sin(l\varphi + \varphi_0) \\ \sin(l\varphi + \varphi_0) & \cos(l\varphi + \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: l 表示产生光学旋涡的拓扑荷。为获得位相面沿顺时针方向变化的拓扑荷为 l 光学旋涡,需要调制波片组的琼斯矩阵 M_l 表示为:

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos(-l\varphi + \varphi_0) & \sin(-l\varphi + \varphi_0) \\ \sin(-l\varphi + \varphi_0) & -\cos(-l\varphi + \varphi_0) \end{bmatrix} = M_l H_0 \quad (8)$$

即,调制波片组的琼斯矩阵之间存在如下关系:

$$M_l = M_{l-1} H_0 M_1 \quad (9)$$

因此,对于任意拓扑荷 l 的光学旋涡,可通过上述波片组调制圆偏光产生:

$$E_{OV-l} = M_l E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-il\varphi} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$E_{OV-l} = M_l E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{il\varphi} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (11)$$

由以上公式可以发现:对于任一高阶拓扑荷的光学旋涡可以通过底拓扑荷的光学旋涡联合涡旋波片和半波片联合调制产生;另一方面,对于负数拓扑荷的光学旋涡可通过一个半波片调制对应正数拓扑荷的光学旋涡产生。基于此,可以通过涡旋偏振调制波片和半波片的组合来产生任意拓扑荷的光学旋涡。

由此可见,当一束圆偏光经过满足上述调制特性的涡旋偏振调制波片和半波片的组后,可以调制任意拓扑荷的光学旋涡。图 1(a)所示为基于上述方法的光学旋涡产生和检测系统示意图,其中下半部分为利用涡旋波片产生光学旋涡的光路图,可以通过 CCD 上接收到的光斑分布对产生的光学旋涡进行实时监测。

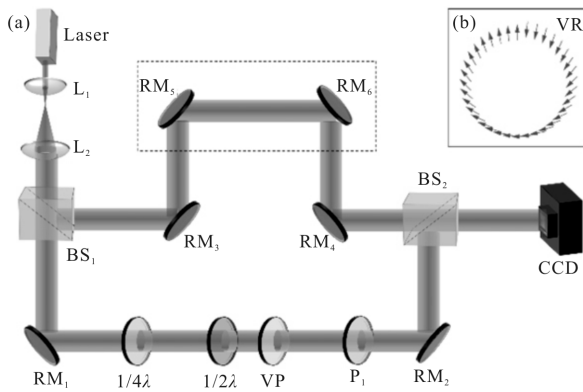


图 1 (a) 光学旋涡产生光路图, (b) 箭头所示为涡旋波片长轴方向

Fig.1 (a) Setup of optical vortex generation, (b) Arrows depict long axis direction of the VR

2 光学旋涡的实验产生及检测

实验中所采用的涡旋波片是一种快轴方向沿波片圆周连续旋转液晶半波片(Thorlabs Inc.),其激光透过率高达 98%,其快轴方向如图 1(b)中箭头所示。通过该涡旋波片和半波片组合可将入射的圆偏振光高效率、高纯度地调制为光学旋涡。由于中心处存在的位相奇点,光学旋涡通常呈环形分布,图 2 所示为直接用 CCD 接收到的光学旋涡强度分布。此外,针对光学旋涡的产生效率进行了测量,当入射圆偏振光功率为 12.1 mW 时,测量调制产生的拓扑荷为 1-3 的光学旋涡的能量分别为 11.8、11.5、11.3 mW,

即对于拓扑荷为 3 的光学旋涡的产生效率仍高达 93%以上。

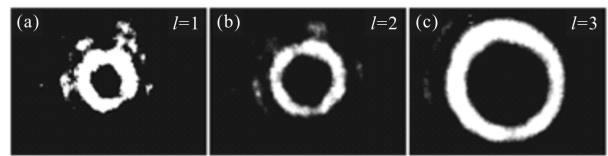


图 2 不同拓扑荷的光学旋涡的光强分布

Fig.2 Intensity distribution of the generated optical vortices with different topological charges

通过光强分布通常很难对光学旋涡所携带的拓扑荷值进行定性和定量分析,因此还需要进一步的方法来判定旋涡所携带拓扑荷的大小和正负。光学旋涡与线偏光干涉会形成叉形干涉条纹,产生的叉形数量跟旋涡所携带的拓扑荷相等,而且不同旋向的旋涡产生的叉形条纹的方向相反^[13]。因此,通过产生的光学旋涡与线偏光干涉产生的叉数可以对产生光学旋涡的拓扑荷进行检验。图 1(a)为产生光学旋涡与入射线偏光干涉检验的光路图,图 3 所示为基于上述方法产生的不同拓扑荷的光学旋涡与线偏光合束后,在 CCD 上接收到的干涉条纹分布。根据第一节描述不难发现,反向旋转的光学旋涡可通过改变调制入射圆偏光的旋向自由切换。实验中实现了六种拓扑荷的光学旋涡的产生,并研究了其干涉产生的叉形条纹,通过叉的数量和开口方向,可以很方便地对产生的旋涡的拓扑荷进行定量检测。

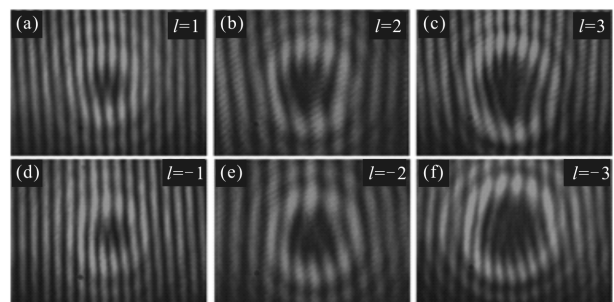


图 3 不同拓扑荷光学旋涡与线偏光的干涉图案

Fig.3 Interference pattern of a linearly polarized beam with generated optical vortices, under topological charges

飞秒光学旋涡近年来也得到越来越多的关注,研究人员也利用各种方法实现了对飞秒光学旋涡的调制^[17-18]。由于脉冲激光的一个重要特性是脉冲的高时间分辨性,传统的调制飞秒激光的过程由于需要反复经过多重光学器件,因而造成光束频谱展宽等

色散问题,从而严重影响飞秒激光脉冲的峰值及时间分辨特性。文中提出的光学旋涡产生与检测系统不仅可用于产生任意拓扑荷的连续光学旋涡,且同时适用于脉冲激光领域。前期工作中已利用该波片完成了飞秒矢量光束的产生^[9],并对产生光束的时间特性进行测量,结果表明,该波片对于脉冲激光虽然会由于色散带来一定的展宽,但影响不大。同样地,进一步利用该方法针对脉冲光学旋涡的产生进行了初步实验,结果如图 4 所示。结果表明,对于飞秒脉冲激光调制产生的光学旋涡同样保持了良好的特性。

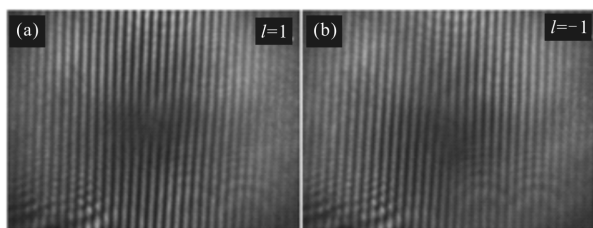


图 4 基于文中方法产生的不同拓扑荷的飞秒光学旋涡
Fig.4 Generated femtosecond optical vortices with topological charges using the method proposed in the paper

3 基于光学旋涡的光镊操控

近十几年来,光学旋涡被广泛应用于光学操作等领域^[20]。因此,在产生的光学旋涡的基础上,进一步开展了光学操控的初步探索和研究。光学旋涡通过紧聚焦入射到金属膜上激发表面等离子激元 (SPP),由于光学旋涡携带的轨道角动量可以传递到 SPP 上,产生 SPP 光学旋涡。因此当金属颗粒位于 SPP 场内时,会实现光学捕获并由于轨道角动量的作用而实现操控^[21]。图 5 所示为利用上述方法产生的拓扑荷为 3 的光学旋涡激发 SPP 进行光学操控的实验结果。

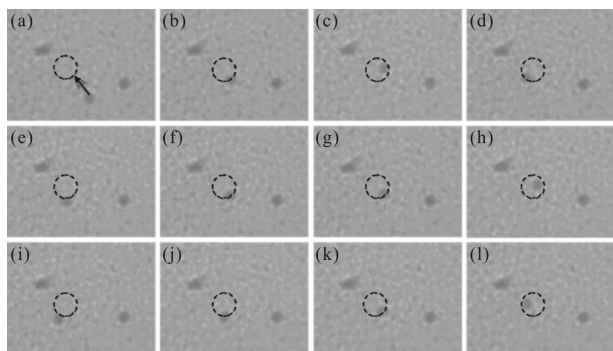


图 5 拓扑荷为 3 的光学旋涡激发的表面等离子激元操控金颗粒
Fig.5 Plasmonic manipulation of gold particles excited by optical vortex with topological charge of 3

不难发现,当颗粒位于 SPP 场附近时,首先被吸引到 SPP 光学旋涡所在位置,由于 SPP 旋涡所携带的轨道角动量的作用,颗粒会沿 SPP 圆环做的圆周运动,该实验结果也验证了所产生的光学旋涡具有良好的特性。

4 结束语

文中利用涡旋波片和半波片组合的方法将圆偏振光调制成预置拓扑荷的光学旋涡,该方法具有转换效率高、灵活调制等优点。同时,也解决了现有针对脉冲光学涡旋产生过程中,需要反复经过多重光学器件造成光束频谱展宽等色散的问题,可以很好地应用于脉冲激光领域。干涉实验结果证明了调制产生光学旋涡的基本特性。针对光学旋涡在光学微操控领域中的应用,利用产生的光学旋涡激发表面等离子激元,并实现了对金属颗粒的捕获和旋转操控。该光学旋涡调制方法在加工、通信、光学操控、表面增强拉曼散射研究等前沿领域都具有重大意义。

参考文献:

- [1] Soskin M, Vasnetsov M. Singular optics [J]. *Progress in Optics*, 2001, 42(4): 219-76.
- [2] Dennis M R, O'holleran K, Padgett M J. Singular optics: optical vortices and polarization singularities [J]. *Progress in Optics*, 2009, 53: 293-363.
- [3] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [4] Wang Z, Zhang N, Yuan X C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 482-492.
- [5] Gao Chunqing, Zhang Shikun, Fu Shiyao, et al. Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0201001. (in Chinese)
高春清, 张世坤, 付时尧, 等. 涡旋光束的自适应光学波前校正技术[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0201001.
- [6] Ng J, Lin Z, Chan C T. Theory of optical trapping by an optical vortex beam [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 104(10): 103601.
- [7] Sztatowski M, Popiofekmasajada A, Masajada J. Optical vortex in microscopy imaging [C]//Proceedings of SPIE,

- 2014, 9194: 91941D.
- [8] Stephen M. Barnett. On the quantum core of an optical vortex[J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55(14): 2279–2292.
- [9] Fadeeva T A, Volyar A V, Alekseev A N. Recognition of the interference spiral image in a fiber optical sensor employing optical vortices [J]. *Technical Physics Letters*, 2004, 30(8): 622–625.
- [10] Yuan X C, Ahluwalia B P S, Tao S H, et al. Wavelength-scalable micro-fabricated wedge for generation of optical vortex beam in optical manipulation [J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(2): 209–213.
- [11] Moh K J, Yuan X C, Bu J, et al. Generating radial or azimuthal polarization by axial sampling of circularly polarized vortex beams [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7544.
- [12] Huang Lingling. Phase modulation property of metasurfaces based on chiral field interaction and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0634001. (in Chinese)
黄玲玲. 基于手性光场作用的超颖表面的相位调控特性及其应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0634001.
- [13] Li Shaoxiang, Wang Zhenwei. Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(14): 141110.
- [14] Zhu Yanying, Yao Wenying, Li Yuntao, et al. Experiment of vertex beam generated by method of computer generated holography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3907–3911. (in Chinese)
朱艳英, 姚文颖, 李云涛, 等. 计算全息法产生涡旋光束的实验[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3907–3911.
- [15] Moh K J, Yuan X C, Tang D Y, et al. Generation of femtosecond optical vortices using a single refractive optical element[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88: 091103.
- [16] Yu Tokizane, Kazuhiko Oka, Ryuji Morita. Supercontinuum optical vortex pulse generation without spatial or topological-charge dispersion[J]. *Optics Express*, 2009, 17: 14517.
- [17] Mariyenko I G, Strohaber J, Uiterwaal C J G J. Creation of optical vortices in femtosecond pulses [J]. *Optics Express*, 2005, 13: 7599.
- [18] Schwarz A, Rudolph W. Dispersion-compensating beam shaper for femtosecond optical vortex beams [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 2970–2972.
- [19] Zhang Yuquan, Dou Xiujie, Yang Yong, et al. Flexible generation of femtosecond cylindrical vector beams [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030007.
- [20] Dienerowitz M, Mazilu M, Reece P J, et al. Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4991–4999.
- [21] Zhang Y, Shi W, Shen Z, et al. A plasmonic spanner for metal particle manipulation[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15446.