

doi:10.3788/gzxb20154404.0426005

基于光楔阵列产生光学涡旋阵列的研究

柴忠洋, 王祺昌, 曾臻, 张效栋, 房丰洲

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津微纳制造工程技术中心, 天津 300072)

摘 要:在研究光楔衍射法产生单涡旋的基础上, 基于长条形光楔阵列, 提出了利用光束阵列衍射产生涡旋阵列的方法. 该方法要求光束阵列在平行于光楔边缘方向上的光束间距等于光束直径的整数倍. 利用超精密机床采用一体化加工法加工了光楔阵列元件, 验证了该方法的可行性. 利用空间光调制器快速灵活调整光束阵列的优点, 搭建了借助空间光调制器加载达曼光栅衍射产生所需光束阵列的实验光学系统. 针对光束阵列与光楔阵列的匹配问题, 研究了达曼光栅掩模图基本单元对光束阵列的调控, 获得了可调结构的光束阵列. 实验产生了拓扑荷一致的光学涡旋阵列, 与仿真结果相一致, 证明所提方法的有效性.

关键词:物理光学; 光学涡旋; 光楔衍射法; 光楔阵列; 光束阵列; 空间光调制器; 达曼光栅

中图分类号: O431.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0426005-5

Research on the Generation of Optical Vortex Array Using a Wedge Array

CHAI Zhong-yang, WANG Qi-chang, ZENG Zhen, ZHANG Xiao-dong, FANG Feng-zhou
(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Centre of MicroNano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the study of the generation of single optical vortex by the diffraction of optical wedge, an optical vortex array generation method was proposed. The diffraction of optical array by the rectangular optical wedge array was used to generate vortex array in the proposed method. If the spacing between adjacent beams in the direction paralleled to the wedge edge is equal to an integer times of the beam diameter, the beam array irradiation on the rectangular optical wedge array will produce vortex array. Then simulation was implemented for the verification of the feasibility. The wedge array was fabricated practically by the ultra-precision machine with integrated processing method. As the spatial light modulator can adjust beam array fast and flexibly, the experimental system was established, in which the spatial light modulator was used to generate the desired beam array by Dammam grating diffraction. The regulation of basic unit of Dammam grating mask pattern on beam array was researched in order to match the beam array and wedge array. The beam array with adjustable structure was obtained finally. The optical vortex array with same topological charge was generated successfully. The experimental and the simulative results have good agreement, which proved that the optical wedge array can generate vortex array effectively.

Key words: Physical optics; Optical vortex; Wedge diffraction; Wedge array; Beam array; Spatial light modulator; Dammam grating

OCIS Codes: 260.1960; 260.3160; 090.1760

0 引言

光学涡旋是具有螺旋形波前和相位奇点的空心光

束, 都具有确定的轨道角动量 $nh^{[1]}$, 其中 n 为光学涡旋的拓扑荷. 它在光学微操作领域具有十分广泛的应用, 可以用于捕获直径为几十纳米到几十微米的细胞、高

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(No. 2011CB706700)资助

第一作者: 柴忠洋(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学涡旋阵列的产生及其应用. Email: Chaizytju@163.com

导师(通讯作者): 张效栋(1979-), 博士, 副教授, 主要研究方向为超精密加工、光学自由曲面制造及应用. Email: zhangxd@tju.edu.cn

收稿日期: 2014-10-22; 录用日期: 2014-12-24

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

分子聚合物等微粒^[2-3],并使微粒绕自身旋转,便于对微粒进行三维操控和观察研究.另外,它在空间光通信^[4]、信息存储^[5]等领域的应用也具有十分明显的优势.目前将厄米-高斯光束转为拉盖尔-高斯光束,使光场具有螺旋形相位和轨道角动量,是产生光学涡旋的重要方法.现如今产生光学涡旋的方法主要有:几何光学模式变换法^[6]、计算全息法^[7]、液晶空间光调制法^[8]、螺旋相位板法^[9]、光楔衍射法^[10-11]五种方法.光楔衍射法仪器简单,稳定可靠,通过调节入射光斑的直径,可以使用同一块光楔利用不同波长的光束产生光学涡旋^[12],因此在现有方法中具有一定优势.

光学涡旋阵列具有多个光学涡旋,可以同时捕获和观察多个微粒,与单涡旋相比可以大大提高工作效率,符合多个甚至大量微粒进行捕获、操作和观察的应用需求.目前,国内外关于利用光楔产生光学涡旋的研究主要是针对单光学涡旋,而并没有涉及如何利用光楔来产生光学涡旋阵列.涡旋阵列产生的主要方法是干涉法,基于改进的马赫曾德尔干涉仪或迈克尔逊干涉仪^[13-14]来实现,所用仪器昂贵,需要精密的调整并且不稳定.相比之下,基于光楔结构的光学涡旋阵列系统将更好地实现多微粒捕获和操控.本文在光楔衍射法产生单涡旋的基础上展开了涡旋阵列的研究,同时在光楔阵列加工和利用空间光调制器(Spatial Light Modulator,SLM)调节光束阵列,实现光束阵列与光楔阵列匹配方面进行了相关的研究.

1 光楔衍射法产生涡旋阵列的原理

图1是光楔衍射法产生单个光学涡旋的原理.光源产生的光束只有一半照射在光楔上.两部分光束的交线处将发生平行于光楔边界的衍射现象,通过光楔的那半部分光束将会稍微偏移入射方向,两部分光束发生干涉.干涉的极小值将会出现在两部分光束夹角的等分线平面,这样干涉和衍射的节点将会完全垂直.如果干涉场和衍射场在节线交汇点附近的相位差等于 $\pi/2$ 的整数倍,干涉后就会产生光学涡旋^[10].

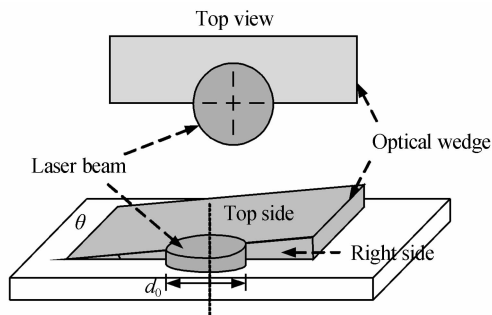


图1 光楔衍射法原理

Fig.1 Schematic diagram of optical wedge diffraction

光楔衍射法产生拓扑荷等于1的完整涡旋时,光束直径 $d_0 = \lambda / [(n-1) \tan \theta]$,其中 λ 为光的波长, n 为

光楔的折射率, θ 为光楔的夹角.若高斯光束照射光楔,则光束的束腰半径应为 $w_0 = d_0 / 2$.

图2是光楔衍射法的仿真结果.仿真中所用光楔的材料为聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate,PMMA),其折射率 $n=1.491756$,光楔夹角 $\tan \theta=0.0006431$,激光的波长 $\lambda=532\text{ nm}$,计算得 $w_0=0.84\text{ mm}$.当 $w_x = w_y = 0.84\text{ mm}$ 时,可以得到如图2(a)所示完整的光学涡旋,图2(b)为衍射结果的相位图,可以看出中间光场是一个拓扑荷等于-1的光学涡旋.但是当束腰半径 w 远大于 w_0 时,例如2(c)($w_x=0.84\text{ mm}, w_y=8.0\text{ mm} \gg w_0$)和图2(d)($w_x = w_y = 8.0\text{ mm} \gg w_0$)所示,衍射后将会产生一连串紧密相连的沿光楔长度方向分布的涡旋^[15].

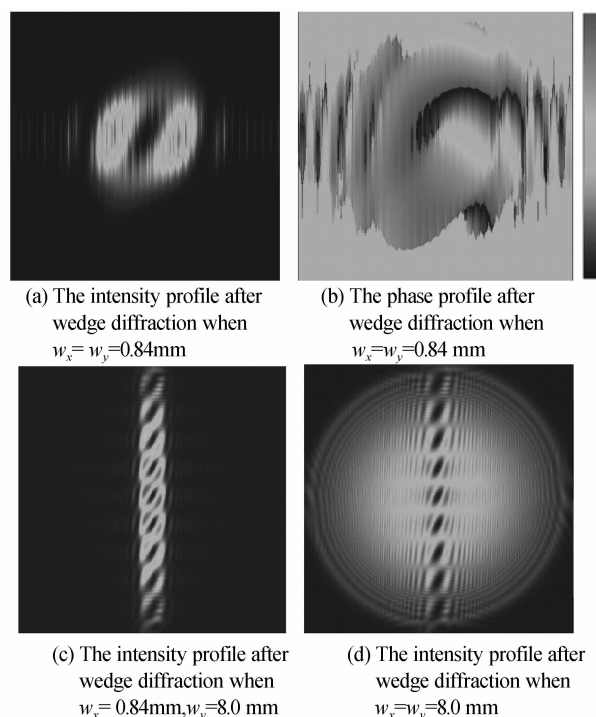


图2 不同束宽的高斯光束照射光楔得到的衍射图样
Fig.2 Simulation results of Gaussian beam with different waist radius irradiation on an optical wedge

由此,如果用一系列光束间距 L 等于光束直径 d 整数倍的光束照射光楔,衍射后的涡旋就能相互分离,并且相邻两光束的对应位置由光楔引起的相位差等于 2π 的整数倍,因此衍射结果是相同的,从而得到与光束数量相同的一维光学涡旋阵列.如果用多列光束和多条光楔,并且光楔的间距合适衍射后就可以产生二维的涡旋阵列.为此,进行了仿真实验.按照图3光楔阵列和光束阵列方式,使用图4(a)所示 3×3 的方形阵列高斯光束(其中: $L=3.36\text{ mm}, d=1.68\text{ mm}$)进行光楔阵列衍射产生涡旋阵列实验,实验结果如图4(b)所示.由仿真结果可以看出得到的9个涡旋是完整的,一致性比较好的涡旋阵列.此种设计的光楔阵列可以用来产生拓扑荷相同的良好涡旋阵列.然而,这种设计仅

仅利用了光楔的一个边缘,如果单条光楔的宽度合适,可以利用一个光楔的两个边缘同时产生两列涡旋,如图5所示.图中的两列涡旋是镜像关系,拓扑荷分别等于 ± 1 .这种拓扑荷相异的涡旋可以用来捕获空气中的粒子^[16].

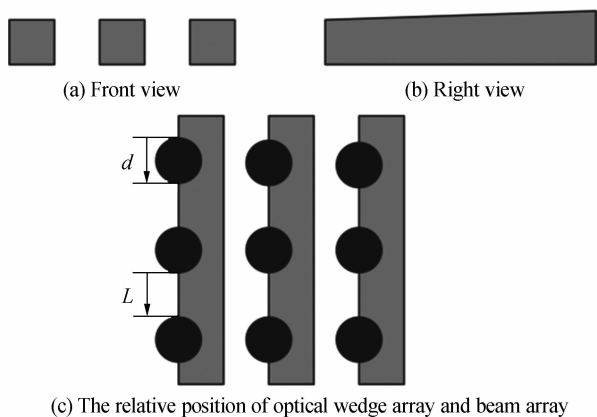


图3 1x3光楔阵列示意图
Fig. 3 1x3 optical wedge array

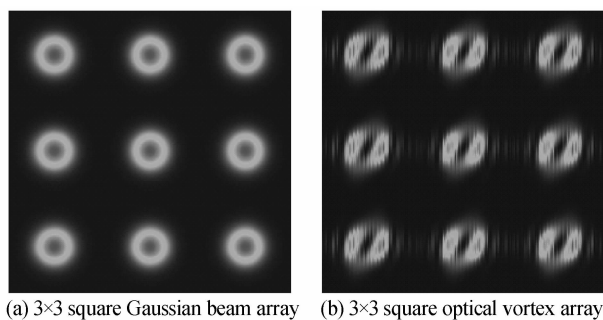


图4 方形阵列高斯光束仿真实验

Fig. 4 Simulation of a square Gaussian beam array

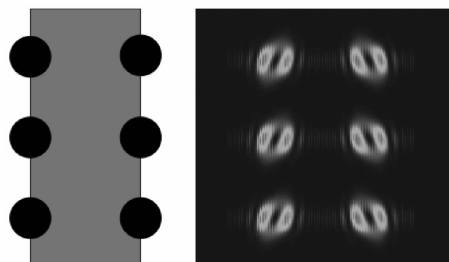


图5 单条光楔产生两列拓扑荷相异涡旋仿真实验

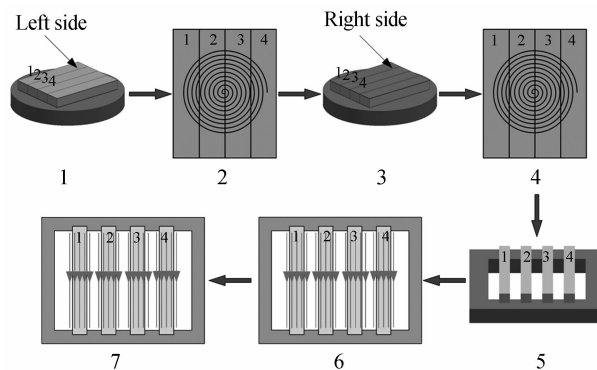
Fig. 5 Simulation of using a wedge to generate two columns of optical vortices with opposite topological charge

2 实验与结果分析

2.1 光楔加工

图6为光楔阵列加工流程图.实验所用光楔阵列材料为具有良好光学性能的PMMA,光楔的长、宽、厚分别为30 mm、4 mm、6 mm,光楔前表面角度 $\tan \theta = 0.000\ 643\ 1$,光楔间距等于2 mm.对于单条光楔,上下两个面不影响光楔的光学性能,因此仅需要对每个光楔的前后左右四个面分别进行加工.加工过程中,先将

四条光楔的左侧面朝上紧密黏贴固定在一个平面上,用Nanotech 350机床采用旋转加工的方法将左侧面车削成一个平面;然后再将右侧面朝上紧密黏贴固定在平面上,同样采用旋转加工的方法将右侧面加工成一个平面.加工上下表面的过程中,为了保证每个光楔的一致性,采用了一次成型的加工方法.首先直接在显微镜下将光楔都贴在支架上形成阵列,然后将光楔阵列的上表面正对刀具,将其刨削成所要求的斜面,接着将工件旋转 180° 使光楔的下表面正对刀具,将下表面加工成平面.光楔粘贴的时候由于胶水渗入下表面可能引起下表面不同程度的倾斜,采用这样的加工方法可以在刨削的时候将此倾斜消除,使光楔阵列的上下表面具有很好的一致性.用Olympus 3D形貌测量显微镜对加工的光楔上下表面进行多点测量,其表面粗糙度不超过19 nm,不足波长的二十分之一,表明光楔具有良好的表面质量.



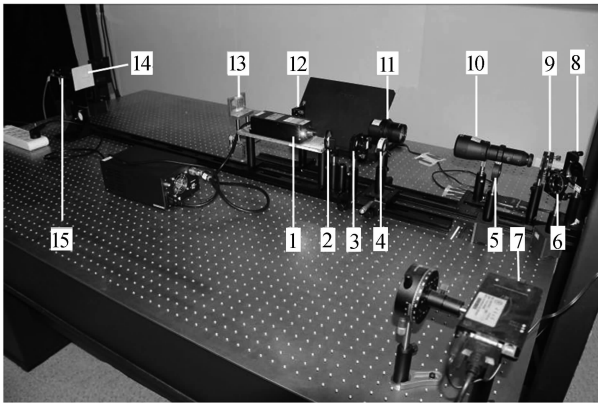
1. Fixed with the left sides upward; 2. Turning the left sides to a plane with a spiral path; 3. Fixed with the right sides upward; 4. Turning the right sides to a plane with a spiral path; 5. Paste into a wedge array; 6. Planing the top sides; 7. Planing the bottom sides

图6 光楔阵列加工流程

Fig. 6 Fabrication process of optical wedge array

2.2 光学系统搭建

为了验证仿真的结果,搭建了图7所示的光学系统.系统所用光源为532 nm单纵模激光器,为了保护光学元件,需要加入一可凋衰减器进行功率衰减.与微透镜阵列相比,SLM可以通过编程方式快速灵活地调节光束阵列的参量,因此选用其作为系统的分束元件.由于激光的光斑直径比较小,为了扩大SLM的照射面积,从而提高SLM对激光的调制能力,需要加入两个透镜4和5($f_1 = 100\text{ mm}$, $f_2 = 200\text{ mm}$)对激光进行一定的扩束.两个反射镜6和8是用来改变光路,保证激光以尽可能小的角度(小于 6°)入射到SLM上,从而提高SLM的衍射效率.同时,SLM前后各需加入一偏振片(3和9),提高SLM对光束的调制效果.衍射后得到的光束阵列尺寸比较小,需要可调扩束器10进行扩束;扩束后的光束阵列仍有比较大的发散角,因此需要两透镜11和12($f_1 = 100\text{ mm}$, $f_2 = 225\text{ mm}$)进行光束的准直.若准直后的平行光参量合适,照射在光楔阵列



1. 532nm laser; 2. Variable attenuator; 3. Polarizer; 4. Beam expander lens ($f_1=100\text{mm}$); 5. Beam expander lens ($f_2=200\text{mm}$); 6. Mirrors; 7. Phase only SLM; 8. Mirrors; 9. Polarizer; 10. 2 \times -5 \times variable laser beam expander; 11. Collimating lens 1 ($f_1=100\text{mm}$); 12. Collimating lens 2 ($f_2=225\text{mm}$); 13. Optical wedge array; 14. Image plane; 15. CCD

图 7 实验光学系统
Fig. 7 Experimental optical system

上在一定的距离就可以得到涡旋阵列。

2.3 空间光调制器的作用

在整个光路中,光学系统放大倍数的不连续调整导致光束阵列和光楔阵列的对应比较困难.这里通过对 SLM 加载的达曼光栅掩膜图进行调节,实现调节光束阵列尺寸,从而实现光束阵列与光楔阵列相匹配的目的.产生特定光束阵列的光栅掩膜图都由掩膜图基本单元通过重复复制产生的,通过调节基本单元的尺寸就可以改变光束阵列的参量.掩膜图基本单元是一个二维灰度图案,表 1 和 2 中提供了产生 5 \times 3 不同间距光束阵列的掩膜图基本单元,其具有不同像素的宽度 W 和高度 H .

由表 1 可以看出掩膜图基本单元越宽,光束阵列越窄,宽度变化越慢.实验中可以通过加载基本单元尺寸扩大到两倍的达曼光栅,调节 SLM 软件中的放大倍

表 1 不同宽度的光栅掩膜图基本单元产生的光束阵列

Table 1 Beam arrays generated by grating mask pattern with the basic unit of different width

W	30	40	50	60
Basic unit of gratings mask pattern				
Beam array				

表 2 不同高度的光栅掩膜图基本单元产生的光束阵列

Table 2 Beam arrays generated by grating mask pattern with the basic unit of different height

H	50	60	70	80
Basic unit of gratings mask pattern				
Beam array				

数至 50%,产生同样的光束阵列,但光束阵列宽度的变化量缩小到原来的一半.光束阵列纵向的微小变化对涡旋影响不大,因此还可以通过扩束器对光束阵列

宽度进行微小调节.

2.4 光楔阵列产生涡旋阵列实验

实验所需光束计算得到 $d=1.68\text{ mm}$,因此所需阵

列的纵向间距等于 3.36 mm , 总体高度为 $9d = 1.51 \text{ cm}$, 横向光束间距等于 8 mm , 总体宽度 1.768 cm . 实验中经过调节后得到了的 5×3 光束阵列如图 8(a)所示, 将其照射在三条光楔的左侧, 衍射后用 CCD 在光楔阵列后 1 m 处获得的光强分布图如图 8(b)所示. 从图可以看出, 光楔衍射后得到了 5×3 的具有相同拓扑荷涡旋阵列, 涡旋的一致性不太好是由于扩束获得的光束阵列与理想阵列有所差异, 涡旋边缘有拖尾的杂散光是由光楔边缘的多级衍射以及光楔的倾斜导致双边缘衍射引起的, 可以通过光楔阵列的调节将其减弱. 实验表明基于光楔衍射法利用光楔阵列可较好地产生涡旋阵列.

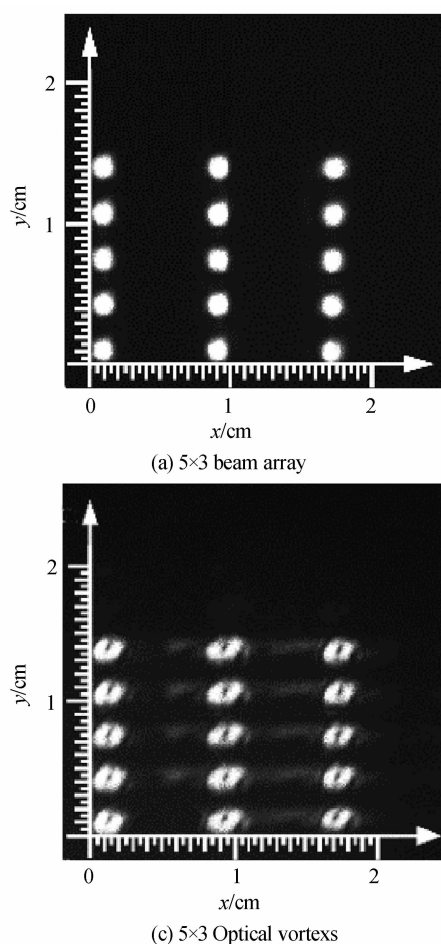


图 8 实验得到的光束阵列和涡旋阵列
Fig. 8 Beam array and vortex array generated by experiment

3 结论

本文提出了利用光楔阵列产生涡旋阵列的方法, 并进行了仿真和实验验证. 实验中还采用一次成型的方法加工了一致性良好的光楔阵列, 并在实验中发现

可以通过调节全息图基本单元的整体宽度和高度来调节光束阵列的横向和纵向间距, 实现光束阵列和光楔阵列的匹配. 在后续的研究过程中, 作者将针对涡旋阵列与显微镜的耦合和微粒捕获进行深入研究, 将涡旋投入到实际应用中.

参考文献

- [1] 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]. *Physical Review A*, 1992, **45**(11): 8185-8189.
- [2] SATO S, HARADA Y, WASEDA Y. Optical trapping of microscopic metal particles[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(22): 1807-1809.
- [3] GAHAGAN K T, SWARTZLANDER G A. Optical vortex trapping of particles[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(11): 827-829.
- [4] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(22): 5448-5456.
- [5] VOOGD R J, SINGH M, BRAAT J J M. The use of orbital angular momentum of light beams for optical data storage[C]. Optical Data Storage Topical Meeting 2004. International Society for Optics and Photonics, 2004: 387-392.
- [6] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, VAN DER VEEN H, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, **96**(1): 123-132.
- [7] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, *et al.* Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(3): 221-223.
- [8] CURTIS J E, KOSS B A, GRIER D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Optics Communications*, 2002, **207**(1): 169-175.
- [9] KOTLYAR V V, ALMAZOV A A, KHONINA S N, *et al.* Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, **22**(5): 849-861.
- [10] SHVEDOV V G, IZDEBSKAYA Y V, ALEKSEEV A N, *et al.* The formation of optical vortices in the course of light diffraction on a dielectric wedge [J]. *Technical Physics Letters*, 2002, **28**(3): 256-259.
- [11] IZDEBSKAYA Y, SHVEDOV V, VOLYAR A. Generation of higher-order optical vortices by a dielectric wedge[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(18): 2472-2474.
- [12] 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.
- [13] VYAS S, SENTHILKUMARAN P. Interferometric optical vortex array generator[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(15): 2893-2898.
- [14] VYAS S, SENTHILKUMARAN P. Vortex array generation by interference of spherical waves[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(32): 7862-7867.
- [15] IZDEBSKAYA Y. Optical necklaces generated by the diffraction on a stack of dielectric wedges[J]. *Physics Letters A*, 2008, **372**(21): 3909-3913.
- [16] SHVEDOV V G, DESYATNIKOV A S, RODE A V, *et al.* Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air[J]. *Applied Physics A*, 2010, **100**(2): 327-331.