

基于飞秒激光的可运动微结构加工与旋转驱动

袁宏伟, 饶生龙, 吴东, 李家文, 胡衍雷

引用本文:

袁宏伟, 饶生龙, 吴东, 等. 基于飞秒激光的可运动微结构加工与旋转驱动[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 584–590.

YUAN Hong-wei, RAO Sheng-long, WU Dong, et al. Fabrication and rotation driving of movable microstructures based on femtosecond laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 584–590.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0584>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水凝胶支架的飞秒激光全息加工

Femtosecond laser holographic fabrication of hydrogel cell scaffold

光学精密工程. 2017, 25(9): 2277–2282 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2277>

毛细力辅助飞秒激光直写制备各向异性及多级结构

Fabrication of anisotropic and hierarchical structures using femtosecond laser printing capillary force assisted self-assembly

光学精密工程. 2017, 25(8): 2057–2063 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2057>

基于铌酸锂制作光弹调制器用压电驱动器

Fabrication of piezoelectric actuator for photoelastic modulator based on lithium niobate

光学精密工程. 2015, 23(1): 63–69 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152301.0063>

飞秒激光进给速度对TiC陶瓷微孔加工的影响

Effect of feeding speed on micro-hole drilling in TiC ceramic by femtosecond laser

光学精密工程. 2015, 23(6): 1565–1571 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152306.1565>

激光跟踪仪高精度绝对测距系统

High absolute distance measurement system of laser tracker

光学精密工程. 2016, 24(10s): 148–155 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0148>

文章编号 1004-924X(2020)03-0584-07

基于飞秒激光的可运动微结构加工与旋转驱动

袁宏伟, 饶生龙, 吴东, 李家文, 胡行雷*

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027)

摘要:微驱动技术由于驱动方式的多样性和应用的广泛性,在近年来受到了越来越多的关注。本文提出一种利用飞秒激光同时实现微结构加工和旋转驱动的技术。利用双光子聚合加工直径 20~30 μm 的微转子结构,然后结合空间光调制器调制出带有光学轨道角动量的光场,实现对微转子结构的旋转驱动,并获得了 40 r/s 的转动速率。详细介绍了利用飞秒激光直写技术加工可运动微转子结构的实验过程与优化参数,利用空间光调制器生成了不同拓扑荷的涡旋光,研究了其传播与聚焦特性,并用于驱动转子的顺、逆时针旋转运动。这种可控光学驱动技术在微流控、光镊技术、靶向药物运输、细胞动态行为等领域具有广阔的应用前景。

关键词:飞秒激光;空间光调制;涡旋光;光驱动

中图分类号:TN249;TM359.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202803.0584

Fabrication and rotation driving of movable microstructures based on femtosecond laser

YUAN Hong-wei, RAO Sheng-long, WU Dong, LI Jia-wen, HU Yan-lei*

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

* Corresponding author, E-mail: huyl@ustc.edu.cn

Abstract: In recent years, microdriven technology has attracted increasing attention because of the diversity of driving methods and their extensive applications. This paper proposes a technique of microstructure processing and rotation driving with the use of a femtosecond laser. Microrotor structures with diameters of 20—30 μm were prepared through two-photon polymerization, and then an optical field with an optical orbital angular momentum was modulated using a spatial light modulator to realize the rotation driving of the microrotor structure at a speed of 40 r/s. In addition, the paper presents the detailed experimental process and optimization parameters of the microrotor structure fabricated using the femtosecond-laser direct writing technology. Moreover, the propagation and focusing characteristics of a vortex beam with different topological charges generated through a spatial light modulator are studied and used to drive the clockwise and counterclockwise rotations of the rotor. This controllable light-driven technology has promising applications in the fields of

收稿日期:2019-12-18;修订日期:2020-01-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51875544, No. 91963127, No. 51675503, No. 51805509);统筹推进世界一流大学和一流学科建设专项资金资助(No. YD2090002005);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2017495)

microfluidics, optical tweezers, targeted drug delivery, and cell dynamics.

Key words: femtosecond laser; spatial light modulation; vortex beam; light-driven

1 引言

近年来,微纳米技术发展迅速,多种微纳加工技术、微纳结构的制造得到了研究者的广泛关注,并且取得了长足的进步。其中,可驱动微结构在微纳领域具有举足轻重的地位,这些微结构可以应用在微流控技术^[1]、智能传感^[2]、生物医药^[3]和热力学^[4]等方面。可旋转微结构作为一种物理模型简单、驱动方式灵活、制造方法多样的模型,已经成为一个研究热点。2010年,Xia等通过在光刻胶中掺杂四氧化三铁磁性纳米颗粒,利用飞秒激光双光子聚合技术,实现了微型旋转磁控推动器件的加工^[5]。2014年,Balk等研究者利用超声波驱动纳米马达实现了旋转推进^[6]。2018年,Shao等实现了对等离子体纳米马达的光驱旋转运动控制^[7]。

微转子结构的加工制造可以通过多种方法实现,如激光双光子聚合技术^[8]、化学合成法^[9]和UV刻蚀法^[10-12]等。由于飞秒激光双光聚合具有加工精度高、可控性好、可实现真三维结构加工等优势,被广泛地应用于微纳米器件的加工^[13-16]。而微结构的驱动方式也具有多样性,如磁驱动^[17]、光驱动^[18]和超声驱动^[6]等。其中,光驱动的方式具有非接触性、对被驱动的对象损害小等优点,而且光控制的系统易于集成,在实验系统中应用方便。然而,到目前为止,可运动微结构的加工和驱动都是独立进行的,即微转子的加工和驱动需要两套截然不同的系统来完成,这增加了加工成本和系统复杂度,不利于微驱动和微加工的高效率集成化。

本文提出了一种利用飞秒激光系统同时实现微转子加工和驱动的方法。飞秒激光双光子聚合技术可以制造出不同形态的微转子结构;空间光调制器(Spatial Light Modulator,SLM)可以灵活

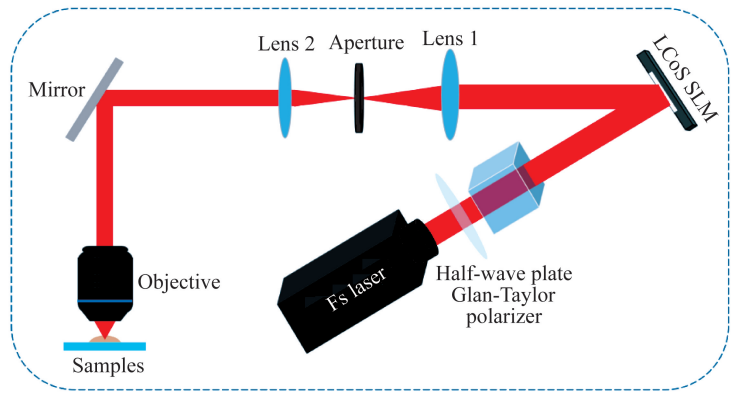
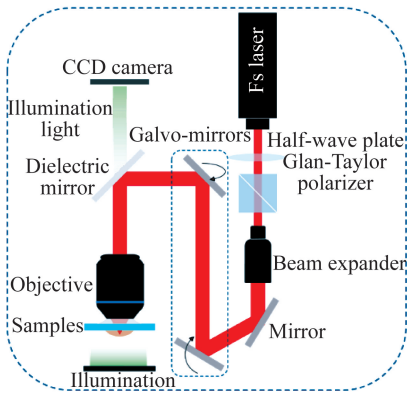
调制出不同拓扑荷的涡旋光场;带有轨道角动量的光场可以驱动微转子结构顺、逆时针以不同的速度旋转。SLM通过动态加载全息图,可以灵活控制光场的参数,以实现微转子的多种运动模式。这种微转子结构可以集成在芯片实验室中,多模式的光驱旋转运动在微流控技术、生物智能传感、精密测量等领域具有广泛的应用前景。

2 加工系统与原理

2.1 飞秒激光加工系统与光学调制系统

飞秒激光直写技术经过近二十年来的发展,已经日臻成熟。将飞秒激光经过物镜聚焦至透明材料内部,使得飞秒脉冲与材料相互作用而发生物理化学性质的改变。该方法加工精度高、控制灵活、适用于加工制造复杂的三维结构。图1(a)所示为飞秒激光直写加工聚焦示意图。入射激光通过物镜聚焦至材料内部,实现三维加工的方式有两种:第一种是通过控制高精度三轴移动台,保持入射光的位置不变,实现样品的三维加工;第二种是使用高速扫描振镜,对入射光进行微小的偏转,实现在二维方向上的运动,结合单轴位移台,实现三维空间中的加工。本实验采用第二种方法实现目标结构的加工。

涡旋光是一种带有轨道角动量的光场,与置于光场中的物体作用会产生相应的力学特性^[19]。硅基液晶空间光调制器(Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator, LCoS SLM)是一种纯相位型调制器,它可以对入射激光的波前相位进行调制,结合傅里叶变换全息理论,可以实现数值和解析光场的调制^[20-21]。如图1(b)所示,入射激光通过反射式LCoS SLM,其波前相位被调制;经Lens1和Lens2组成的4f系统,对光束进行缩放和滤波;再经物镜聚焦,在物镜后焦面实现与加载相位对应的光场分布。



(a) 飞秒激光加工系统聚焦示意图

(b) 飞秒激光相位调制系统示意图

(a) Illustration of focus processing of femtosecond laser processing system

(b) Schematic diagram of femtosecond laser phase modulation system

图 1 飞秒激光加工系统

Fig. 1 Femtosecond laser processing system

2.2 涡旋光场的计算与仿真

涡旋光可以通过螺旋相位板产生。本文通过 LCoS SLM 加载螺旋相位因子全息图,可以便捷、灵活地调制出不同的涡旋光束。入射波前的相位分布函数及其相位全息图分布分别为:

$$\Phi_1(\theta) = \exp(l\theta), \quad (1)$$

$$G_1(\theta) = 255 \cdot \text{mod}(\Phi_1(\theta), 2\pi) / 2\pi, \quad (2)$$

式中: l 是拓扑荷, θ 是相位分布函数的极坐标角度变量。由于 LCoS SLM 的调制方式需要加载 8 位灰度图像,故这里通过式(2)将 $0 \sim 2\pi$ 的相位转化成对应的灰度分布。图 2(a)和 2(b)分别是拓扑荷为 +10 和 -10 的涡旋相位分布灰度全息图。

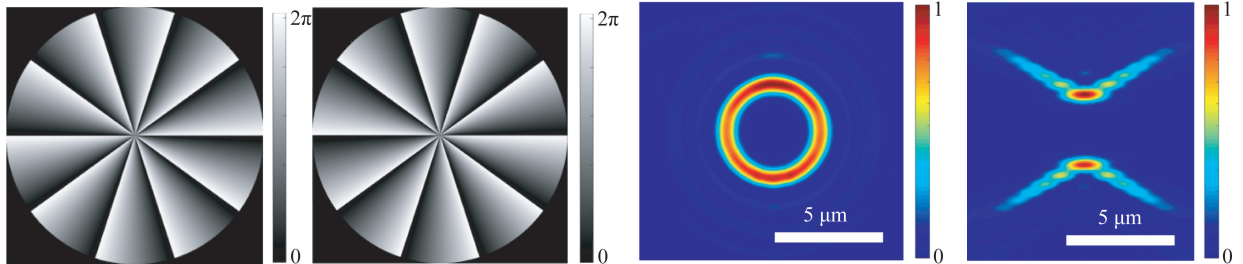
利用 Debye 衍射理论^[22],可以得到物镜后的光场强度分布,其表达式为:

$$E(x, y, z) = \frac{iC}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \sin \theta \sqrt{\cos \theta} \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \exp[ikn_0(z \cos \theta + x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)] d\theta d\varphi, \quad (3)$$

式中: C 是常数, λ 是入射波长, n_0 是浸入介质的折射率, α 是物镜的最大孔径角。 $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ 是和入射光的偏振状态相关的矢量,其表达式为:

$$\mathbf{P}(\theta, \varphi) = [1 + (\cos \theta - 1) \cos^2 \varphi] \mathbf{i} + [(\cos \theta - 1) \cos \varphi \sin \varphi] \mathbf{j} + [\sin \theta \cos \varphi] \mathbf{k}. \quad (4)$$

由此可以计算仿真出三维空间光场的强度分布。如图 2(c)所示,使用拓扑荷为 +10 的全息相位图加载至 LCoS SLM 上,物镜后焦面上得到的光场强度分布特征为含有光学轨道角动量的环状分布。图 2(d)是在物镜后面沿光轴方向的光场强度分布。由图可知,仅在焦平面上光强达到最大,离焦后光强迅速降低,这种光强分布特征有利于转子结构的驱动。实际调制过程中, LCoS SLM 会产生多个级次的衍射光,为了达到最好的调制效果,需要在涡旋相位全息图上叠加闪耀光栅全息图,将 0 级衍射光偏移。



(a) +10 的涡旋相位全息图

(b) -10 的涡旋相位全息图

(c) 聚焦涡旋光在焦平面的光强分布仿真图

(d) 聚焦涡旋光在传播方向的光强分布

(a) Phase holograms with topological charges of +10

(b) Phase holograms with topological charges of -10

(c) Simulation diagram of light intensity distribution of focused vortex beam in focal plane

(d) Light intensity distribution of focused vortex beam in propagation direction

图 2 涡旋相位全息图及涡旋光的光强分布

Fig. 2 Phase holograms and light intensity distribution of vortex beam

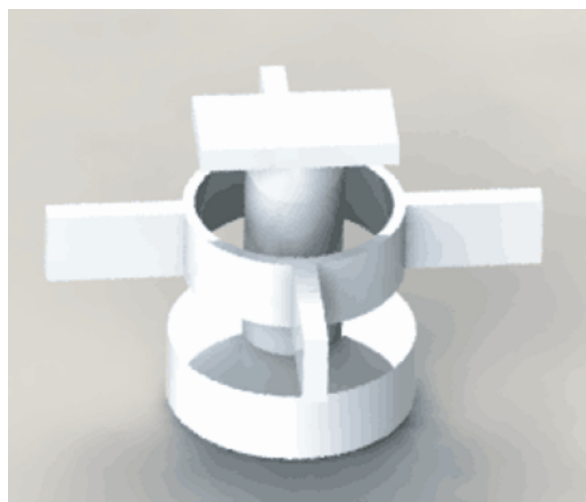
3 实验与结果

3.1 微转子加工

图 3(a)所示为四叶轮微转子结构的三维示意图。采用图 1(a)所示的飞秒激光直写加工系统实现微转子结构的加工。加工实验所用激光的中心波长为 800 nm,脉冲重复频率为 80 MHz,飞秒脉冲的宽度为 75 fs。实验前将 SZ2080 (Greece, IESL FORTH)光刻胶旋涂至盖玻片表面,在 100 °C 条件下保持 1 h,以除去光刻胶中的水分。激光功率选择 5 mW,通过油镜(NA1.35, 60×)将光斑聚焦至光刻胶内部,使得光刻胶发生

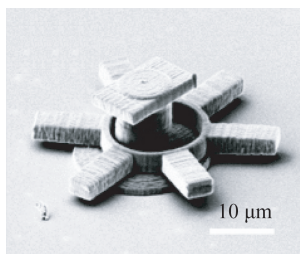
双光子聚合反应。加工完成之后,将样品置于正丙醇溶液中 2 h 进行显影处理,以除去未发生聚合反应的光刻胶。图 3(b)~3(e)是含有不同叶轮数、不同扇叶尺寸的微转子结构的扫描电子显微镜图。由电镜图可知,显影后的转子结构与设计的形貌基本一致,微转子的质量较好。通过修改加工程序,可以灵活地调整微转子的尺寸、叶轮数等参数。

图 4 所示为显影完成的微转子阵列结构在乙醇溶液中的光学显微镜图。在显微镜下可以明显观察到微转子的叶轮部分与固定轴分离,外界液体环境的扰动可以使活叶轮转动。这种微转子的加工效率高,结构的一致性与重复性好。

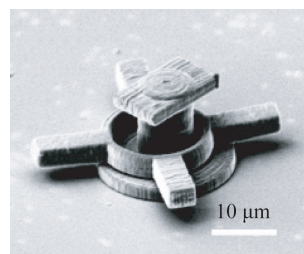


(a)四叶轮微转子结构三维示意图

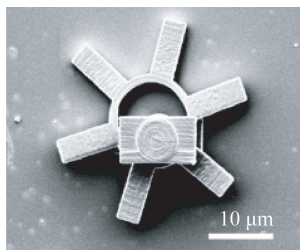
(a)Three-dimensional schematic diagram of a four-vane microrotor structure



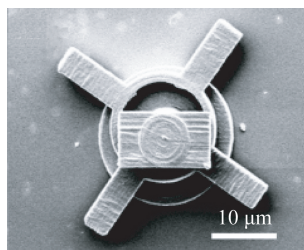
(b)六叶轮转子的扫描电镜 45°视图
(b)45° SEM views of the six-vane rotor



(c)四叶轮转子的扫描电镜 45°视图
(c)45° SEM views of the four-vane rotor



(d)六叶轮转子的扫描电镜 90°视图
(d)90° SEM views of the six-vane rotor



(e)四叶轮转子的扫描电镜 90°视图
(e)90° SEM views of the four-vane rotor

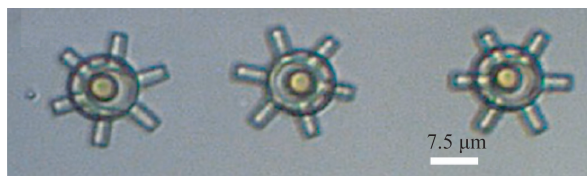
图 3 微转子结构的扫描电镜图

Fig. 3 Scanning Electron Microscope(SEM) images of microrotors



(a)四叶轮微转子结构的光学显微镜图

(a)Optical micrographs of the four-vane microrotor structures with vane length of 7.5 μm



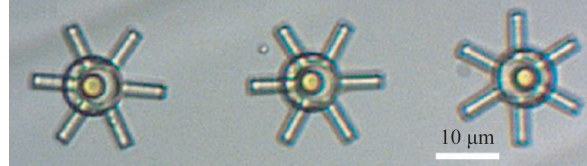
(b)六叶轮微转子结构在乙醇溶液中的光学显微镜图

(b)Optical micrographs of the six-vane microrotor structures with vane length of 7.5 μm



(c)四叶轮微转子结构在乙醇溶液中的光学显微镜图

(c)Optical micrographs of the four-vane microrotor structures with vane length of 10 μm



(d)六叶轮微转子结构的光学显微镜图

(d)Optical micrographs of the six-vane microrotor structures with vane length of 10 μm

图 4 微转子阵列结构在乙醇溶液中的光学显微镜图

Fig. 4 Optical micrographs of microrotors in ethanol solution

3.2 微转子驱动

涡旋光具有轨道角动量,可以用来驱动微球及微结构^[23-25]。如图 5(a)所示,通过 LCoS SLM 加载全息图,物镜下可以调制出环形涡旋光场,环形区域作用于转子叶轮部分,将光学轨道角动量传递至叶轮,可以驱动其旋转。携带轨道角动量的光束具有螺旋性的波前形状。当光束作用于结构时,相当于以一定的螺旋倾斜角度入射到结构

表面,光在材料界面发生吸收和散射,从而将光子的动量转移到了结构上,实现了结构的旋转驱动。实验中,将转子结构放置于乙醇溶液环境中,使用拓扑荷为 +10 与 -10 的全息图产生涡旋光,图 1(b)中 4f 系统的透镜焦距比例为 Lens1 : Lens2 = 2 : 1,聚焦物镜的数值孔径为 0.8,倍数为 50×。通过显微镜的三维位移台,可以调整聚焦光斑与转子的相对位置。



图 5 微转子光驱动

Fig. 5 Light-driven rotation of microrotor

用于旋转驱动的光源与加工所用的飞秒激光相同,入射功率为 300 mW。采用拓扑荷正负性不同的全息图时,转子的旋转方向不同。图 5(b)和 5(c)所示分别为转子在溶液中的旋转图,采用的全息图拓扑荷分别为 +10 和 -10,图中箭头指向为转子旋转的方向,实验测得转子的转速为 40 r/s。值得注意的是,由于实验中利用的是毫瓦量级的激光进行驱动,能量较低,获得的转速较慢;另外,由于转子由光学轨道角动量驱动,且该动量沿涡旋光场切线方向,外界环境的扰动容易导致微转子叶轮偏移涡旋光的中心,从而影响驱动效果。通过实验还可以看到,在物镜焦平面生成的光漩涡直径比理论计算值(见图 2(c))稍大。这是因为通过 4f 系统后光束直径未完全覆盖物镜入瞳孔径,造成物镜的实际数值孔径偏小而导致的。

实验表明,只需要动态切换全息图的拓扑荷就可以改变微转子的旋转状态。通过改变入射激

光的功率、微转子结构的尺寸,能够灵活地实现不同的旋转速度。

4 结 论

本文提出了一种利用飞秒激光同时进行微转子加工和驱动的方法。利用飞秒激光直写技术,通过双光子聚合加工,可以灵活地加工出结构复杂、质量高、一致性好的三维微转子结构;通过计算全息技术,利用 LCoS SLM 加载全息图,可以调制出具有不同光学轨道角动量的涡旋光场。将涡旋光场作用于微转子结构,可以实现转子不同模式的运动。这种微转子结构可以集成在微流控芯片中,结合光驱动的方式,可以用于微流量控制和传感,在微流控系统、智能传感和药物运输等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] MARUO S, TAKAURA A, SAITO Y. Optically

driven micropump with a twin spiral microrotor [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18525-18532.

[2] JURADO-SÁNCHEZ B, ESCARPA A. Milli, mi-

- cro and nanomotors: Novel analytical tools for real-world applications [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2016, 84: 48-59.
- [3] LI J X, THAMPHIWATANA S, LIU W J, *et al.*. Enteric micromotor can selectively position and spontaneously propel in the gastrointestinal tract [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(10): 9536-9542.
- [4] YANG L K, CAI K, SHI J, *et al.*. Significance tests on the output power of a thermally driven rotary nanomotor [J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(21): 215705.
- [5] XIA H, WANG J, TIAN Y, *et al.*. Ferrofluids for fabrication of remotely controllable micro-nanomachines by two-photon polymerization [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(29): 3204-3207.
- [6] BALK A L, MAIR L O, MATHAI P P, *et al.*. KiloHertz rotation of nanorods propelled by ultrasound, traced by microvortex advection of nanoparticles [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(8): 8300-8309.
- [7] SHAO L, KÄLL M. Light-driven rotation of plasmonic nanomotors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(25): 1706272.
- [8] LIN X F, HU G Q, CHEN Q D, *et al.*. A light-driven turbine-like micro-rotor and study on its light-to-mechanical power conversion efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(11): 113901.
- [9] AHN J, XU Z J, BANG J, *et al.*. Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033603.
- [10] KAYNAK M, OZCELIK A, NAMA N, *et al.*. Acoustofluidic actuation of in situ fabricated microrotors [J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(18): 3532-3537.
- [11] 陈立国,王兆龙,卞雄恒.扇形电极微液滴分离的数字微流控芯片 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 1919-1925.
- CHEN L G, WANG ZH L, BIAN X H. Microdroplet split digital microfluidic device with fan-shaped electrode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 1919-1925. (in Chinese)
- [12] 邱亚军,李金泽,李传宇,等.高通量数字化毛细管微阵列芯片 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1237-1244.
- QIU Y J, LI J Z, LI CH Y, *et al.*. High-throughput digital capillary microarray [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1237-1244. (in Chinese)
- [13] CHEN Q D, WU D, NIU L G, *et al.*. Phase lenses and mirrors created by laser micronanofabrication via two-photon photopolymerization [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(17): 171105.
- [14] LIM T W, SON Y, JEONG Y J, *et al.*. Three-dimensionally crossing manifold micro-mixer for fast mixing in a short channel length [J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(1): 100-103.
- [15] MARUO S, IKUTA K, KOROGI H. Submicron manipulation tools driven by light in a liquid [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(1): 133-135.
- [16] 潘登,李家文,杨亮,等.水凝胶支架的飞秒激光全息加工 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2277-2282.
- PAN D, LI J W, YANG L, *et al.*. Femtosecond laser holographic fabrication of hydrogel cell scaffold [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2277-2282. (in Chinese)
- [17] TOTTORI S, ZHANG L, QIU F, *et al.*. Magnetic helical micromachines: fabrication, controlled swimming, and cargo transport [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(6): 811-816.
- [18] SOLOVEV A A, SMITH E J, BOF'BUFON C C, *et al.*. Light-controlled propulsion of catalytic microengines [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(46): 10875-10878.
- [19] 高红芳,任煜轩,刘伟伟,等.酵母细胞在涡旋光阱中的旋转动力学研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 113-118.
- GAO H F, REN Y X, LIU W W, *et al.*. Rotation dynamics of yeast cell in vortex optical tweezers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 113-118. (in Chinese)
- [20] ZHANG CH, HU Y L, LI J W, *et al.*. An improved multi-exposure approach for high quality holographic femtosecond laser patterning [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(22): 221104.
- [21] 杨亮.基于空间光调制器的飞秒激光并行加工技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015.
- YANG L. *Research on Parallel Femtosecond Laser Fabrication Technologies with Spatial Light Modulator* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [22] HAO X, KUANG C F, WANG T T, *et al.*. Effects of polarization on the de-excitation dark focal spot in STED microscopy [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(11): 115707.
- [23] GECEVIČIUS M, DREVINSKAS R, BERESNA M, *et al.*. Single beam optical vortex tweezers

with tunable orbital angular momentum [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(23): 231110.

- [24] HERNE C M, CAPUZZI K M, SOBEL E, *et al.*. Rotation of large asymmetrical absorbing objects by Laguerre-Gauss beams [J]. *Optics Letters*,

2015, 40(17): 4026-4029.

- [25] LOKE V L, ASAVEI T, STILGOE A B, *et al.*. Driving corrugated donut rotors with Laguerre-Gauss beams [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19692-19706.

作者简介:



袁宏伟(1994—),男,硕士研究生,主要从事毛细力自组装和微驱动方面的研究。E-mail: sa179061@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



胡衍雷(1984—),男,副教授,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事超快激光微纳米加工技术、微纳米光子学、仿生表面和结构制造等方面的研究。E-mail: huyl@ustc.edu.cn