

基于空间光调制器的飞秒激光双模式快速加工

吴培超^{1**}, 张晨初^{2*}, 杨亮¹, 李家文¹, 胡衍雷¹, 吴东^{1***}

¹中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

²合肥工业大学工业与装备技术研究院, 安徽 合肥 230009

摘要 提出了基于空间光调制器(SLM)的飞秒激光双模式双光子聚合加工方式。通过在空间光调制器上加载相应的全息图,可以实现焦点控制扫描加工和图形化曝光加工模式。这两种加工模式不但可以保证加工质量,而且能够提高双光子聚合加工的效率。采用这两种不同的模式,分别加工了里约奥运会会徽和不同形状的模式,验证了这两种加工方式在微纳加工领域的可行性。

关键词 激光技术; 飞秒激光; 空间光调制器; 焦点控制模式; 图形化曝光; 微纳加工

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001005

Femtosecond Laser Dual-Mode Rapid Fabrication Based on Spatial Light Modulator

Wu Peichao^{1**}, Zhang Chenchu^{2*}, Yang Liang¹, Li Jiawen¹, Hu Yanlei¹, Wu Dong^{1***}

¹Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Institute of Industry & Equipment Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract The femtosecond laser dual-mode two-photon polymerization fabrication method based on a spatial light modulator (SLM) is proposed. The fabrication modes of focus control scanning and patterned exposure are realized by the load of the corresponding holograms on the SLM. These two fabrication modes not only ensure the fabrication quality, but also increase the fabrication efficiency of two-photon polymerization. By these two different modes, the Rio Olympic emblem and patterns with different shapes are fabricated, respectively. The feasibilities of these two fabrication methods in the micro-nano fabrication field are verified.

Key words laser technique; femtosecond laser; spatial light modulator; focus control mode; patterned exposure; micro-nano fabrication

OCIS codes 140.3390; 090.1760; 220.4000

1 引 言

飞秒激光双光子聚合加工能够达到百纳米的加工精度,具有三维加工能力^[1],在微流体芯片^[2]、生物医学^[3]、微光学^[4-5]、微机械^[6]等领域都有广泛的应用。Kawata 等^[7]利用飞秒激光双光子聚合加工出纳米牛。此后,研究者们应用该技术加工出微透镜^[8]、微齿轮^[9]、微混合器^[10]、微过滤器^[11]等多种微纳功能器件。传统的飞秒激光双光子聚合是将高

斯光束聚焦在材料内部,通过点到点的扫描方式来加工^[12],通常需要几小时甚至几十小时。这种加工效率不能满足实际加工的需要,而且完成一些特定的三维结构还要借助于一些昂贵的装置,比如精密的三维移动平台等。为了提高双光子聚合加工的效率,研究者们采用并行加工^[13-19]或结构光^[20-26]进行加工。但是,并行加工和结构光场只能用于加工具有特定周期或者轮廓的微结构,缺乏一定的灵活性。

在飞秒激光双光子逐点扫描加工中,焦点位置

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-04-25; 录用日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51275502,61475149,51405464,91223203,91423103,11204250)、中国青年千人计划、安徽省自然科学基金(1408085ME104)、中央高校基本科研业务费专项资金(WK6030000004)

* E-mail: nanozcc@ustc.edu.cn; ** E-mail: peichaow@mail.ustc.edu.cn; *** E-mail: dongwu@ustc.edu.cn

的控制对加工结果影响很大。焦点控制通常有两种实现形式:1) 通过使用三维压电平台控制焦点位置;2) 使用高精度转镜配合单轴压电台控制焦点位置。但是这两种实现形式的设备都比较昂贵,不利于飞秒激光双光子加工的应用。空间光调制器(SLM)作为一种能够对二维光场进行调制的光学器件,通过驱动信号,可以对入射光场的相位、振幅、偏振等性质进行调制^[27]。通过在空间光调制器上加载闪耀光栅和球面波因子,可以很方便地控制焦点在三维方向上的移动,从而实现飞秒激光双光子焦点控制的扫描加工。

空间光调制器的灵活性还体现在其可以用于图形化曝光加工。对于给定的目标图案,通过 GSW (Weighted Gerchberg-Saxton) 算法产生计算全息 (CGH)^[28],在空间光调制器上加载对应目标图案的计算全息可以实现图形化加工。本文对目标图案生成计算全息时,给定任意的初始相位,生成对应于同一目标图的 20 张不同的计算全息图,然后以一定的速率加载到空间光调制器上,实现飞秒激光图形化曝光加工。相对于单次曝光加工,结构的表面形貌得到了很大的改善^[29]。同时研究了基于空间光调

制器的两种模式,即焦点控制扫描加工和图形化面型光场曝光加工的可行性,为飞秒激光双光子聚合加工能够更加高效地应用到微纳加工领域提供了新的方式。

2 实验装置

使用美国相干公司生产的 Chamleon Vision-S 型飞秒激光器,输出功率为 2.3 W,脉冲宽度为 75 fs,中心波长为 800 nm,脉冲频率为 80 MHz。采用德国 Holoeye 公司生产的 Pluto-NIRG2 型空间光调制器,像元尺寸(直径)为 8 μm ,刷新频率为 60 Hz。图 1 所示为加工光路,通过 1/2 波片和格兰棱镜调节飞秒激光的输出功率。飞秒激光经扩束镜扩束后入射到空间光调制器的液晶面上,同时在空间光调制器上加载不同模式对应的相位全息,进而实现飞秒激光双光子聚合的焦点控制扫描加工和图形化多次面曝光加工。经空间光调制器反射后,光经过由透镜 1 和 2 组成的 4F(F 为焦距)系统进行滤波,再通过 100 \times 物镜聚焦到样品上。采用的样品是旋涂在盖玻片上的希腊 IESL FORTH 公司的 SZ2080 型负性光刻胶。

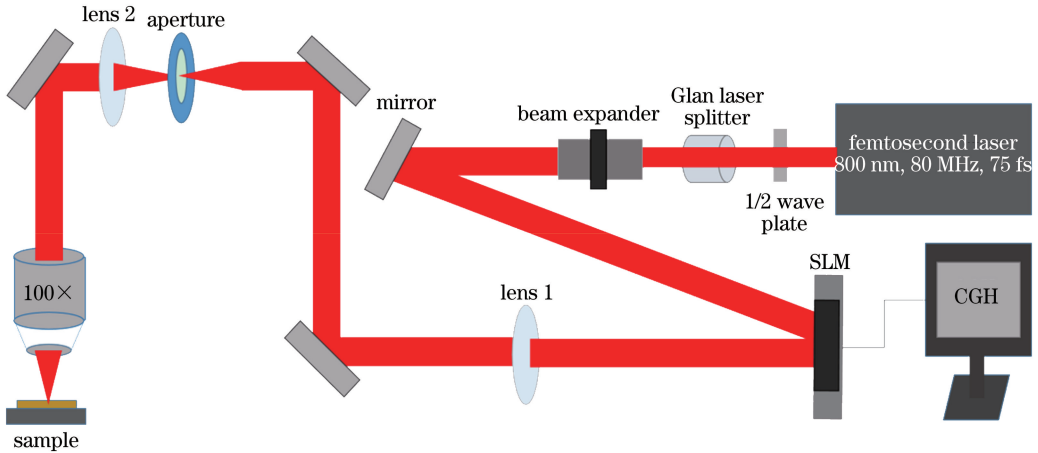


图 1 基于空间光调制器的飞秒激光双模式加工系统示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser dual-mode fabrication system based on SLM

3 基于空间光调制器的焦点控制扫描加工模式

3.1 扫描加工的工艺研究

在空间光调制器上加载闪耀光栅可以控制焦点在弧矢面(xoy 平面)的位置,叠加球面波因子可以控制焦点在光轴方向(z 方向)的位置,进而实现控制焦点位置的单点扫描加工。在上述实验条件下,通过加载相应的全息图, x 、 y 、 z 三个方向上焦点移

动的最大距离分别为 80,80,30 μm 。探究了焦点控制单点扫描加工的最优输出功率值。图 2 所示为叠加闪耀光栅后,不同输出功率下加工结构的扫描电子显微镜(SEM)图。由图 2 可知,随着输出功率的增加,单点加工的精度也在不断提升。这主要是因为空间光调制器存在“死区”和有效区域,“死区”是对入射光几乎没有调制作用的一部分区域。由于“死区”存在光栅效应,飞秒激光经过空间光调制器实现相位调制后,在光场分布中表现为焦点的中心

输出功率较大,而边缘输出功率较小。输出功率较小时这种现象比较明显。图 2(d)展示的结构相对于图 2(a)的结构,表面形貌有了很大的改善。在叠加闪耀光栅后的二维扫描加工中,不同的闪耀角对加工的分辨率和均匀性会产生一定的影响,但是这

里加载的闪耀光栅的闪耀角比较小,对实际加工的影响很小。当输出功率高于 20 mW 时易产生过曝,低于 20 mW 时,由于空间光调制器的“死区”效应比较明显,输出功率分布不均匀,因此 20 mW 为最适合焦点控制扫描加工的输出功率值。

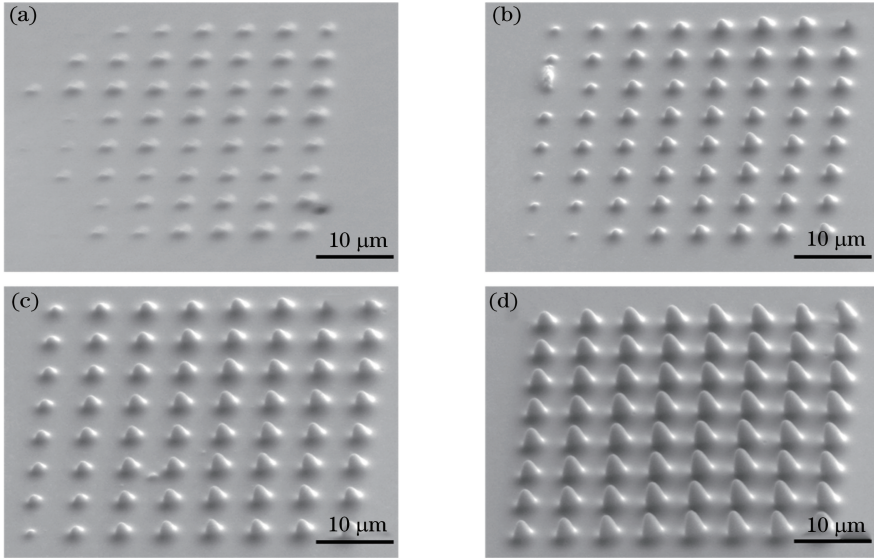


图 2 焦点控制模式下不同输出功率时通过叠加闪耀光栅加工得到的点阵结构的 SEM 图。

(a) 5 mW; (b) 10 mW; (c) 15 mW; (d) 20 mW

Fig. 2 SEM images of lattice microstructures obtained by superimposing blazed grating under focus control mode for different output powers. (a) 5 mW; (b) 10 mW; (c) 15 mW; (d) 20 mW

3.2 利用焦点控制扫描模式进行图形化三维加工

对于任意给定的图形结构,可以通过算法将图形结构进行解析,并输出多张全息图。在加工过程中,每张全息图依次对应一个焦点位置,通过连续加载结构对应的全部全息图,焦点沿着设定的路径进

行扫描加工。通过逐层扫描加工了 2016 年里约奥运会会徽。层间距为 $0.4 \mu\text{m}$,共扫描三层。通过算法计算得到 1500 多张全息图,将这些全息图依次加载到空间光调制器上,加工结果如图 3 所示。由图 3 可知,采用 5,10,15 mW 输出功率加工的结构表

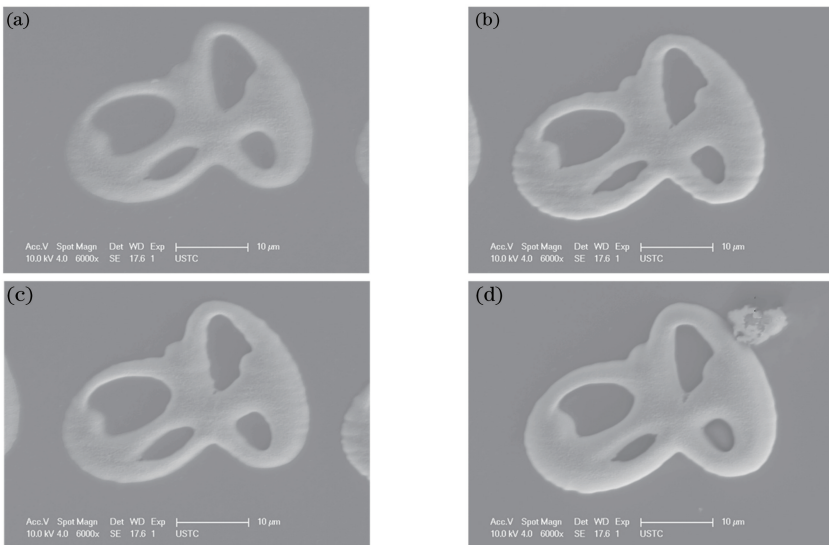


图 3 不同输出功率下焦点控制模式加工的里约奥运会会徽结构的 SEM 图。(a) 5 mW; (b) 10 mW; (c) 15 mW; (d) 20 mW

Fig. 3 SEM images of Rio Olympic emblem under focus control mode for different output powers.

(a) 5 mW; (b) 10 mW; (c) 15 mW; (d) 20 mW

面较粗糙,而当输出功率为 20 mW 时,得到的结构表面形貌比较平滑。

4 基于空间光调制器的图形化面型光场曝光加工模式

4.1 图形化面型光场曝光的原理

对于给定的任意目标图案,使用 GSW 算法生成计算全息图。由于给定图像的初始相位是任意的,得到对应于同一张目标图案的 20 张不同的计算全息图,然后以一定的速率加载到空间光调制器上,

进而实测光场分布图。图 4(a)~(c)分别为实心菱形、六边形及空心菱形目标图形的单张全息对应的光场分布实测图,图 4(d)~(f)是 20 张全息图循环加载到空间光调制器上后得到的光场分布图。由图 4 可知,通过加载多张全息图,得到的光场分布图的均一性有了很大的提升。这是因为当这些全息图形循环加载到空间光调制器上后,由于它们的初始相位随机,且目标图都是同一个连续分布的图形化面型光场,因此叠加后的全息图可以使噪声平均化,从而减轻或消除斑点噪声对结构的影响。

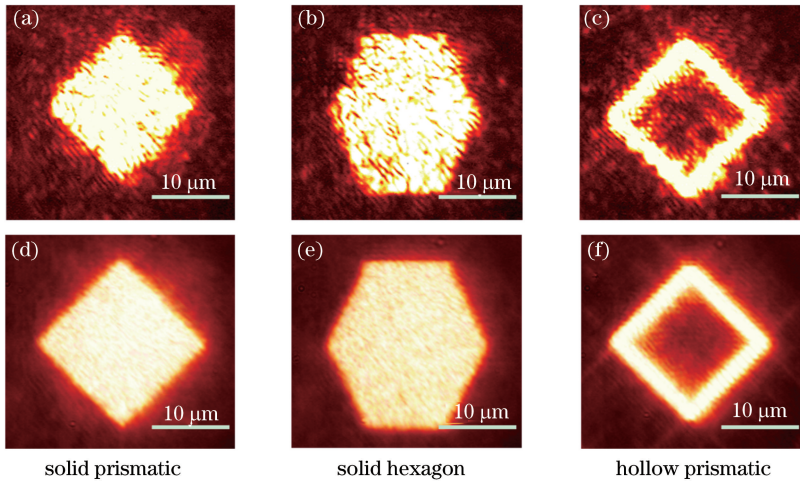


图 4 不同目标图对应的全息加载到空间光调制器上后得到的光场。(a)(b)(c)单张;(d)(e)(f) 20 张
Fig. 4 Light fields obtained after load of holograms corresponding to different target patterns on SLM.
(a)(b)(c) Single hologram; (d)(e)(f) 20 holograms

4.2 图形化面型光场用于无掩模光刻加工

在保证加工精度的条件下,进一步提高光刻胶的曝光加工的厚度。采用图 1 所示的实验光路,将光刻胶旋涂在盖玻片上,然后在甩胶机上以 $1000 \text{ r}\cdot\text{m}^{-1}$ 转速甩胶 65 s,得到厚度为 $15 \mu\text{m}$ 的光刻胶,图 5(a)~

(c)分别为对应使用图 4(e)~(f)所示的均一性光场加工得到的结构 SEM 图。由图 5 可知,结构的表面质量较好。每个图形的加工时间为 1 s,输出功率为 400 mW,这种方式极大提高了飞秒激光双光子聚合的加工效率,而且能保证一定的加工质量。

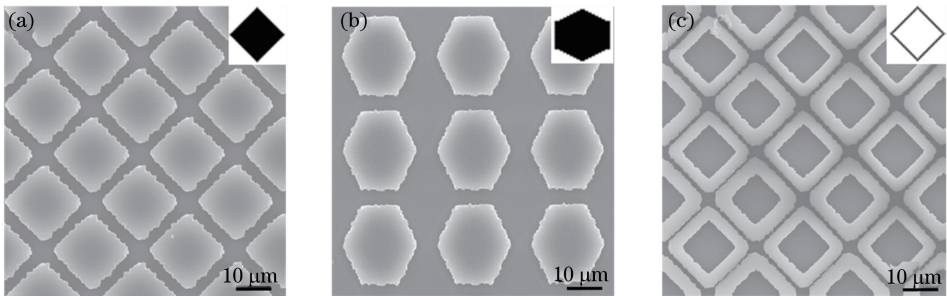


图 5 通过图形化曝光模式叠加 20 张全息得到的不同图形结构的 SEM 图。(a)实心菱形;(b)六边形;(c)空心菱形
Fig. 5 SEM images of different structures obtained by superposition of 20 holograms under patterned exposure mode. (a) Solid prismatic; (b) hexagon; (c) hollow prismatic

5 结 论

提出了基于空间光调制器的飞秒激光双模式双

光子聚合加工方式。通过在空间光调制器上加载闪耀光栅和球面波因子的相位全息图,实现了焦点控制三维扫描加工,当选择最优加工输出功率

(20 mW)时,相比传统的逐点扫描的加工方法,这种加工方式更高效、灵活;在同一个光路装置中,通过在空间光调制器上循环加载对应于同一张目标图的20张计算全息图,实现了图形化面型光场曝光,得到了表面质量较好的二维图形化结构。实验验证了基于空间光调制器的焦点控制扫描加工和图形化面型光场曝光加工的可行性。后续将研究将焦点控制扫描加工与图形化面型光场曝光加工相结合的方式应用到包含二维和三维复杂微纳结构的快速加工领域。

参 考 文 献

- [1] Fischer J, Wegener M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 7(1): 22-44.
- [2] Wu D, Chen Q D, Niu L G, *et al.* Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices [J]. *Lab on a Chip*, 2009, 9(16): 2391-2394.
- [3] Lin C L, Wang I, Dollet B, *et al.* Velocimetry microsensors driven by linearly polarized optical tweezers [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 329-331.
- [4] Chen Q D, Wu D, Niu L G, *et al.* Phase lenses and mirrors created by laser micromanufacturing via two-photon photopolymerization [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(17): 171105.
- [5] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, *et al.* Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [6] Wang J, Xia H, Xu B B, *et al.* Remote manipulation of micromanomachines containing magnetic nanoparticles [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 581-583.
- [7] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, *et al.* Finer features for functional microdevices [J]. *Nature*, 2001, 412(6848): 697-698.
- [8] Wu D, Wu S Z, Niu L G, *et al.* High numerical aperture microlens arrays of close packing [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(3): 031109.
- [9] Sun H B, Kawata S. Two-photon laser precision microfabrication and its applications to micro-nano devices and systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(3): 624-633.
- [10] 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.
- [11] Wang J, He Y, Xia H, *et al.* Embellishment of microfluidic devices via femtosecond laser micromanufacturing for chip functionalization [J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(15): 1993-1996.
- [12] Chong T C, Hong M H, Shi L P. Laser precision engineering: From microfabrication to nanoprocessing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(1): 123-143.
- [13] Gittard S D, Nguyen A, Obata K, *et al.* Fabrication of microscale medical devices by two-photon polymerization with multiple foci via a spatial light modulator [J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(11): 3167-3178.
- [14] Kelemen L, Valkai S, Ormos P. Parallel photopolymerisation with complex light patterns generated by diffractive optical elements [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14488-14497.
- [15] Xu B, Du W Q, Li J W, *et al.* High efficiency integration of three-dimensional functional microdevices inside a microfluidic chip by using femtosecond laser multifoci parallel microfabrication [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19989.
- [16] Matsuo S, Juodkazis S, Misawa H. Femtosecond laser microfabrication of periodic structures using a microlens array [J]. *Applied Physics A*, 2005, 80(4): 683-685.
- [17] Kato J, Takeyasu N, Adachi Y, *et al.* Multiple-spot parallel processing for laser micromanufacturing [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(4): 044102.
- [18] Sakakura M, Sawano T, Shimotsuma Y, *et al.* Fabrication of three-dimensional 1×4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12136-12143.
- [19] Jenness N J, Wulff K D, Johannes M S, *et al.* Three-dimensional parallel holographic micropatterning using a spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15942-15948.
- [20] Lin H, Gu M. Creation of diffraction-limited non-Airy multifocal arrays using a spatially shifted vortex beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 084103.
- [21] Zhang S J, Li Y, Liu Z P, *et al.* Two-photon polymerization of a three dimensional structure using beams with orbital angular momentum [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(6): 061101.
- [22] Wang A D, Jiang L, Li X W, *et al.* Mask-free patterning of high-conductivity metal nanowires in open air by spatially modulated femtosecond laser pulses [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(40): 6238-

- 6243.
- [23] Ni J C, Wang C W, Zhang C C, *et al.* Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17011.
- [24] Yang L, Qian D D, Xin C, *et al.* Two-photon polymerization of microstructures by a non-diffraction multifoci pattern generated from a superposed Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 743-746.
- [25] Zhang C C, Hu Y L, Li J W, *et al.* A rapid two-photon fabrication of tube array using an annular Fresnel lens [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (4): 3983-3990.
- [26] Liu L P, Zhang S J, Yang H, *et al.* Fabrication of double-helix microstructures by two-photon polymerization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102006.
- 刘力谱, 张世杰, 杨宏, 等. 双螺旋微结构的双光子聚合制备[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102006.
- [27] Weiner A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(5): 1929-1960.
- [28] Di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (4): 1913-1922.
- [29] Zhang C C, 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.